

MODELAÇÃO NUMÉRICA 3D DE ESCOAMENTOS EM DESCARREGADORES DE CHEIA

Aplicação ao descarregador de cheias
complementar do aproveitamento hidroelétrico
da Caniçada

LUÍS ANDRÉ PINTO BRANDÃO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA AMBIENTAL E
RECURSOS HÍDRICOS**

Orientador: Professor Doutor Rodrigo Jorge Fonseca de Oliveira Maia

Coorientador: Doutora Lúcia Teixeira Couto

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2014/2015

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2014/2015 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A quem me é muito.

*Sobre o teu sorriso de encantar
Ouvirás cantando nas alturas
Trovas e cantigas de embalar*
José Afonso

AGRADECIMENTOS

A presente dissertação de mestrado é fruto de um intenso trabalho da parte dos diferentes intervenientes. Em detrimento de todo esse trabalho gostaria de deixar, em primeiro lugar, a minha gratidão a quem me acompanhou a nível académico na elaboração da presente dissertação: ao Professor Rodrigo Maia e à Doutora Lúcia Couto. Foi importante e proveitoso receber o conselho e guia de pessoas com tão vasta experiência no meio académico.

Um importante agradecimento também à EDP e ao LNEC pela possibilidade de trabalho concedida no modelo físico reduzido de Caniçada que muito acrescentou à experiência pessoal desenvolvida e à presente dissertação.

Deverei também mencionar e agradecer a quem me auxiliou muito durante a campanha de medições realizada no LNEC. Em especial ao António Muralha e também à Adelaide Gonçalves e ao Ricardo Jónatas o meu muito obrigado por toda a ajuda e apoio. Uma nota de agradecimento também aos restantes estagiários, técnicos e funcionários do LNEC que muito bem me receberam na minha (curta, mas gratificante) estadia. Devo também referir o Miguel Silva com o qual troquei algumas impressões que foram importantes para o desenrolar do trabalho.

Uma nota de gratidão a quem comigo partilhou o espaço durante a realização do presente trabalho e me auxiliou sempre que possível e necessário. Ao Pedro, à Ana Margarida, ao Ricardo, ao António, o meu obrigado. Um agradecimento muito especial a quem por muito tempo me suportou a trabalhar a seu lado e que por muitas mais me ajudou ao longo da elaboração da presente dissertação. Mahdi, muito obrigado pela sempre disponível ajuda em muitas das adversidades que fui encontrando e pelas (por vezes longas) conversas que muito serviram para relaxar do trabalho árduo. «*Mahdi, thank you for always help available in many of the adversities that I was lying. Thanks for the (for long times) conversations that served to relax from hard work*».

Por fim, o maior agradecimento não poderia de deixar de ser para quem sempre me guia e suporta em todos os momentos sendo que a fase de elaboração do presente documento não foi exceção. À minha família, amigos e colegas, o meu eterno obrigado por tudo!

O agradecimento a ti, Madrinha...

Modelação numérica 3D de escoamentos em descarregadores de cheia.

Aplicação ao descarregador de cheias complementar do aproveitamento hidroelétrico da Caniçada.

RESUMO

Os modelos numéricos na sua generalidade têm vindo a adquirir um peso maior na resolução de problemas complexos no âmbito da Engenharia Hidráulica nomeadamente no estudo de diferentes fenómenos em estruturas complexas. Embora existam alguns estudos que tenham registado sucesso na aplicação dos modelos numéricos, os modelos CFD ainda não são um procedimento fiável em casos práticos de estruturas complexas de engenharia, recorrendo-se ainda em algumas situações a modelos físicos para suporte de projeto de estruturas complexas.

O presente trabalho pretende avaliar a capacidade de um modelo numérico prever a situação real, nomeadamente numa estrutura complexa como um descarregador de cheias. Aplica-se um modelo numérico ao descarregador de cheias complementar do aproveitamento hidroelétrico de Caniçada. Para a calibração e validação dos resultados tomou-se como termo de comparação os valores medidos no modelo reduzido deste descarregador, construído no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), em Lisboa.

A comparação, entre modelo numérico e físico, dos resultados obtidos pelas diferentes simulações numéricas é estabelecida para diferentes grandezas físicas e em diferentes secções do descarregador. A comparação baseou-se, portanto, em: medições de níveis piezométricos e determinação das pressões no fundo do vão esquerdo do descarregador (16 pontos) e nos muros laterais (20 pontos) para 5 diferentes caudais; medição de velocidades (8 secções) para 2 caudais de diferente ordem de grandeza; medição do alcance do jato para 5 caudais e medição de alturas de escoamento (10 secções) para 4 caudais. Para todos os caudais simulados o nível a montante foi mantido constante, de valor igual ao nível de pleno armazenamento (NPA), sendo que a jusante foi definida e estabelecida a altura do leito do rio com base na respetiva curva de vazão de cálculo.

O modelo CFD (*Computational Fluid Dynamics*) utilizado foi o Flow 3D. Foram desenvolvidos testes de sensibilidade para fundamentar a opção de determinadas condições e parâmetros de ensaio a utilizar no modelo numérico de simulação do caso de estudo.

Dos resultados obtidos há a destacar a boa relação entre os caudais descarregados nos dois modelos, com valores de desvio inferiores a 6%, para todas as situações testadas. Nas alturas de escoamento os resultados obtidos pelo modelo numérico são satisfatórios. No entanto a relação entre o modelo numérico e físico não é totalmente satisfatória para todas as secções e/ou caudais. Para os valores de pressão existe, modo geral, uma boa correspondência entre os valores obtidos em modelo físico e numérico. O alcance do jato foi um dos parâmetros medidos que apresentou uma boa correspondência, principalmente para os caudais mais elevados. Por fim, da comparação efetuada para os valores de velocidade, há a realçar a boa correspondência dos resultados em termos qualitativos, registando-se uma variação semelhante entre os dois vãos para os diferentes modelos.

Poder-se-á concluir que os resultados do modelo numérico são bastantes concordantes com os registados em modelo físico ressalvando-se no entanto a existência de algumas discrepâncias para os valores relativos a alturas de escoamento e velocidades em diferentes secções transversais do descarregador.

PALAVRAS-CHAVE: Modelos CFD, Modelos físicos, Flow 3D, Descarregadores de cheia, Caniçada.

Modelação numérica 3D de escoamentos em descarregadores de cheia.

Aplicação ao descarregador de cheias complementar do aproveitamento hidroelétrico da Caniçada.

ABSTRACT

Numerical models in general have acquired an increasing usage in the resolution of complex problems within the framework of Hydraulic Engineering, in particular in the study of different phenomena in complex structures. Although there are some studies that have been successful in the approximation of numerical models to the real case, CFD models (Computational Fluid Dynamics) are not yet a reliable procedure in case studies of engineering. Therefore, it is still a common practice to build physical models supporting design decisions.

This work aims at the evaluation of the ability of a numerical model to approach and predict the real situation, particularly in a complex structure, such as a spillway. A numerical model of the flow through the complementary spillway of the Caniçada dam has been applied. The calibration and validation of the results was based on a comparison with the values measured in the reduced model of this spillway, built at the National Laboratory for Civil Engineering (LNEC) in Lisbon.

This study compares the results of different physical quantities and of different sections of the spillway. The comparison, for different flow rates, was based on: measurements of piezometric levels and pressures in 16 points in the bottom left wall and in 20 sockets installed in the side walls; velocity measurement in 8 sections for different flow rates; measurement of the jet reaching lengths.

Tests in the physical model were performed for different flow rates to evaluate the variation of flow conditions in the spillway with the variation of the discharged flow. Measurements included: four discharge flows piezometric heights and pressure determination, five jet lengths and two flow velocities. In all tests, the upstream level was kept constant, equal to the "Normal Water Level" (NWL) and the downstream water levels were defined on the bases of the stage-discharge curve calculated in the design phase.

The CFD model used was Flow 3D. Sensitivity tests were developed to obtain test conditions and parameters to be used in the numerical model of the case study.

The results obtained highlight the good relationship between the flow discharged in the physical and numerical models. In these results the difference was less than 6% for all flow rates tested. On the flow heights, the results of the numerical model are satisfactory. In general, there is a good correlation between values obtained in the physical and numeric model for the pressure values. The range of the jet length was one of the measured parameters that showed a good match, especially for higher flow rates. Finally, regarding the comparison made for velocity values, there was a good correspondence of the results in qualitative terms, registering similar variation between the two spans for different models.

It can be concluded that the numerical results are quite consistent with those reported in the physical model. However, it is emphasized that there are some differences in the values regarding the flow heights and flow velocities in different cross sections of the spillway.

KEYWORDS: CFD models, physical modeling, 3D Flow, spillway, Caniçada.

Modelação numérica 3D de escoamentos em descarregadores de cheia.

Aplicação ao descarregador de cheias complementar do aproveitamento hidroelétrico da Caniçada.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos da Dissertação.....	2
1.3 Estrutura da dissertação.....	3
2. Caso de Estudo	5
2.1 Caracterização do aproveitamento hidroelétrico da Caniçada.....	5
2.2 Caracterização do descarregador de cheias complementar.....	7
3. Modelos CFD.....	11
3.1 Contextualização histórica.....	11
3.1.1 Génese dos Modelos Numéricos.....	11
3.1.2 Principais trabalhos desenvolvidos.....	13
3.2 Flow 3D.....	16
3.3 Princípios teóricos	17
3.3.1 Modelos numéricos	18
3.3.1.1 Método dos volumes finitos	18
3.3.1.2 Método <i>Volume of Fluid</i>	18
3.3.2 Domínio computacional	18
3.3.2.1 Malha de Cálculo	18
3.3.2.2 Método FAVOR™	19
3.3.3 Condições iniciais e de Fronteira.....	20
3.3.3.1 Condições de fronteira	20
3.3.3.2 Condições Iniciais.....	21
3.3.4 Equações do movimento	22
3.3.4.1 Simulação Numérica Direta.....	22
3.3.4.2 Reynolds-averaged Navier-Stokes equations (RANS)	23
3.3.5 Modelos de Turbulência.....	24
3.3.5.1 Modelo do Comprimento de Mistura de Prandtl.....	24
3.3.5.2 Modelos com uma equação de transporte	25
3.3.5.3 Modelos com duas equações de transporte: $k - \epsilon$	25
3.3.5.4 Modelos com duas equações de transporte: RNG	25
3.3.5.5 Modelos com duas equações de transporte: $k - \omega$	26
3.3.5.6 Large Eddy Simulation, LES	26
3.3.6 GMRES Pressure-Velocity Solvers.....	26
4. Ensaio em Modelo Físico	29
4.1 Condições de ensaio	29
4.1.1 Caudais reproduzidos	30
4.1.2 Secções de estudo.....	30

4.2 Caracterização do escoamento ao longo do descarregador.....	33
4.2.1 Alturas de escoamento	33
4.2.2 Pressões	36
4.2.2.1 Medições	36
4.2.2.2 Pressões para o caudal de projeto de 2062 m ³ /s	36
4.2.2.3 Pressões para o caudal de 896 m ³ /s	37
4.2.2.4 Pressões para o caudal de 690 m ³ /s	38
4.2.2.5 Pressões para o caudal de 527 m ³ /s	39
4.2.2.6 Pressões para o caudal de 303 m ³ /s	39
4.2.3 Alcance do jato.....	40
4.2.4 Velocidades.....	41
5. Ensaio preliminar e de calibração	43
5.1 Soleira normal com paramento vertical	43
5.1.1 Considerações gerais da simulação de uma soleira WES com paramento vertical ..	44
5.1.2 Malha de Cálculo	45
5.1.3 Condições de Fronteira.....	46
5.1.4 Condições de ensaio.....	47
5.1.5 Resultados	48
5.1.6 Teste da influência da mistura de ar no escoamento	50
5.2 Soleira normal de paramento inclinado	51
5.2.1. Considerações gerais	51
5.2.2. Malha de Cálculo	53
5.2.3. Condições de Fronteira.....	53
5.2.4 Condições de ensaio.....	54
5.2.5 Resultados	54
5.3 Testes de sensibilidade em modelo 2D.....	57
5.3.1. Influência da utilização de equações do movimento de 1ª ou 2ª ordem	57
5.3.1.1 Condições de Ensaio.....	57
5.3.1.2 Resultados.....	57
5.3.2. Influência do refinamento da malha.....	58
5.3.2.1 Condições de Ensaio.....	58
5.3.2.2 Resultados.....	59
5.3.3. Influência do emulsionamento de ar	60
5.3.3.1 Condições de Ensaio.....	60
5.3.3.2 Resultados.....	61
5.3.4. Modelo com velocidade inicial na fronteira X min.....	61
5.3.4.1 Condições de Ensaio.....	61
5.3.4.2 Resultados.....	63
5.3.5. Modelo caudal fixo de entrada.....	64
5.3.5.1 Condições de Ensaio.....	64
5.3.5.2 Resultados.....	64
5.3.6. Modelo com zona de aproximação reduzida e caudal fixo.....	66

5.3.6.1 Condições de Ensaio.....	66
5.3.6.2 Resultados.....	66
5.3.7. Modelo com zona de aproximação reduzida e pressão específica de entrada.....	68
5.3.7.1 Condições de Ensaio.....	68
5.3.7.2 Resultados.....	68
5.4. Testes de sensibilidade em Modelos 3D	69
5.4.1 Modelo com condição de fronteira ponto fixo	70
5.4.1.1 Condições de ensaio	70
5.4.1.2 Resultados.....	71
5.4.2. Modelo com condição de fronteira caudal específico	72
5.4.2.1 Condições de ensaio	72
5.4.2.2 Resultados.....	72
5.4.3. Modelo com malha de cálculo mais refinada.....	73
5.4.3.1 Condições de ensaio	73
5.4.3.2 Resultados.....	73
5.5 Considerações gerais de calibração e construção do modelo computacional	74
6. Resultados e Discussão	77
6.1 Caudais descarregados.....	77
6.2 Alturas de escoamento	78
6.2.1 Comparação das alturas de escoamento para o caudal de 896 m ³ /s.....	81
6.2.2 Comparação das alturas de escoamento para o caudal de 690 m ³ /s.....	84
6.2.3 Comparação das alturas de escoamento para o caudal de 527 m ³ /s.....	84
6.2.4 Comparação das alturas de escoamento para o caudal de 303 m ³ /s.....	84
6.3 Pressões	84
6.3.1 Pressões para o caudal de projeto, Q = 2062 m ³ /s	87
6.3.2 Pressões para o caudal de 896 m ³ /s	88
6.3.3 Pressões para o caudal de 690 m ³ /s	88
6.3.4 Pressões para o caudal de 527 m ³ /s	89
6.3.5 Pressões para o caudal de 303 m ³ /s	89
6.4 Alcance do jato	90
6.5 Velocidades	91
6.5.1 Velocidades no modelo computacional	91
6.5.1.1 Velocidades para o caudal de 2062 m ³ /s.....	91
6.5.1.2 Velocidades para o caudal de 896 m ³ /s.....	92
6.5.2 Comparação das velocidades do escoamento para os caudais em estudo	92
6.5.2.1 Comparação das velocidades obtidas para o caudal de 2062 m ³ /s	93
6.5.2.2 Comparação das velocidades obtidas para o caudal de 896 m ³ /s	94
7. Conclusões.....	95
7.1 Considerações finais	95
7.2 Conclusões	98
7.3 Desenvolvimentos Futuros	99
Referências Bibliográficas	101

Anexo A	1
A.1 Planta geral do DCC de Caniçada	3
A.2 Perfil transversal.....	4
A.3 Desenho pormenor trecho de entrada do DCC	5
A.4 Desenho de pormenor da transição canal	6
A.5 Planta topográfica	7
Anexo B	9
B.1 Características do Modelo físico reduzido	11
B.1.1 Caracterização do Modelo Físico	11
B.1.2 Pontos de medição de alturas de escoamento	13
B.2 Alturas de escoamento para as diferentes secções	14
B.3 Medição de velocidades.....	16
Anexo C	17
C.1 Altura de água na zona de aproximação segundo a USACE	19
C.2 Valores de pressão obtidos nos testes de sensibilidades	21
C.3 Considerações do Modelo Numérico	26
C.3.1 Considerações gerais.....	26
C.3.2 Considerações físicas	26
C.3.3 Considerações de fluidos	27
C.3.4 Características geométricas do modelo numérico	27
C.3.5 Malha de cálculo.....	29
C.3.6 Condições de fronteira e Condições iniciais	31
C.3.7 Modelos de cálculo numérico utilizados.....	33
Anexo D	35
D.1 Definição do Modelo Geométrico.....	37
D.2 Configuração final do escoamento, para $t = 100$ s	46
D.2.1 Configuração final para $Q = 896$ m ³ /s	46
D.2.2 Configuração final para $Q = 690$ m ³ /s	51
D.2.3 Configuração final para $Q = 527$ m ³ /s	56
D.2.4 Configuração final para $Q = 303$ m ³ /s	61
D.3 Imagens das velocidades nas diferentes secções de medição.....	66
D.3.1 Imagens da distribuição das velocidades para o caudal de 2062 m ³ /s	66
D.3.2 Imagens da distribuição das velocidades para o caudal de 896 m ³ /s	69
D.4 Configuração final do jato	73
Anexo E	75
E.1 Comparação gráfica das alturas de escoamento	77
E.1.1 Comparação gráfica das alturas de escoamento para o caudal de 690 m ³ /s.....	77
E.1.2 Comparação gráfica das alturas de escoamento para o caudal de 527 m ³ /s.....	82
E.1.3 Comparação gráfica das alturas de escoamento para o caudal de 303 m ³ /s.....	87
E.2 Análise comparativa dos valores de pressão.....	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Localização geral da Barragem de Caniçada (imagem Google Maps, 2014)	5
Figura 2 - Barragem de Caniçada (vista de jusante para montante) (revista Visão, 2012)	6
Figura 3 – Circuito Hidráulico da Barragem de Caniçada (EDP, 2011)	6
Figura 4 – DCC de Caniçada a) Implantação. b) Modelo reduzido (Couto <i>et al.</i> , 2014).	7
Figura 5 - Descarregador de cheias complementar. a) Perfil longitudinal. b) Planta. (Couto <i>et al.</i> , 2014).	8
Figura 6 – Aplicações de modelos CFD a) Modelo de rotura de uma Barragem (Cleary <i>et al.</i> , 2015); b) Descarregador de corpo de barragem (Saunders <i>et al.</i> , 2014)	12
Figura 7 – Interdisciplinaridade dos modelos CFD (adaptado de Jiyuan <i>et al.</i> , 2013)	12
Figura 8 – Implicações do método FAVOR™. Definição do objeto (à esquerda) e objeto criado (direita) (FLOW 3D Documentation, 2014)	20
Figura 9 - Localização das secções de medição e tomadas de pressão (A. Muralha <i>et al.</i> , 2014)	31
Figura 10 – Alturas de escoamento no modelo físico nas secções 1 e 2	34
Figura 11 – Alturas de escoamento no modelo físico nas secções 3 e 4	34
Figura 12 – Alturas de escoamento no modelo físico nas secções 5 e 6	35
Figura 13 – Alturas de escoamento no modelo físico nas secções 7 e 8	35
Figura 14 – Alturas de escoamento no modelo físico nas secções 9 e 10	36
Figura 15 – Critérios de projeto da soleira WES de paramento vertical (USACE, 1970)	44
Figura 16 – Valores de pressão na soleira WES de paramento vertical (USACE, 1970)	44
Figura 17 – Configuração usada na simulação numérica para soleira WES de paramento vertical (plano XZ)	45
Figura 18 – Pormenor da representação da soleira WES pelo método FAVOR™	46
Figura 19 – Soleira WES de paramento vertical: Variação das condições de fronteira em X min	47
Figura 20 – Soleira WES de paramento vertical: Evolução da altura de água ao longo do tempo	48
Figura 21 – Soleira WES de paramento vertical: Evolução temporal do caudal descarregado	48
Figura 22 – Soleira WES de paramento vertical: Dispersão dos resultados de pressão	50
Figura 23 – Soleira WES de paramento vertical sem emulsão de ar: Dispersão dos resultados de pressão	51
Figura 24 – Localização das tomadas de pressão na soleira normal, estrutura de entrada (Muralha <i>et al.</i> , 2014)	52
Figura 25 – Soleira WES com paramento inclinado: Configuração do modelo computacional	52
Figura 26 – Soleira WES com paramento inclinado: Características da soleira normal (Lemos, 1981)	53
Figura 27 – Soleira WES com paramento inclinado: Configuração final do escoamento	55
Figura 28 – Soleira WES com paramento inclinado: Evolução do caudal descarregado	55
Figura 29 – Soleira WES com paramento inclinado: Dispersão dos valores de pressão	56
Figura 30 – Soleira WES com paramento inclinado e equações do movimento de 1ª ordem: Dispersão dos valores de pressão	58
Figura 31 – Soleira WES com paramento inclinado e malha refinada: Dispersão dos valores de pressão	60
Figura 32 – Soleira WES com paramento inclinado sem emulsão de ar: Dispersão dos valores de pressão	61
Figura 33 – Soleira WES com paramento inclinado com velocidade inicial: Configuração inicial	62
Figura 34 – Soleira WES com paramento inclinado com velocidade inicial: Configuração final	63
Figura 35 – Soleira WES com paramento inclinado com velocidade inicial: Evolução do caudal escoado	64
Figura 36 – Soleira WES com paramento inclinado com caudal fixo: Configuração final	64
Figura 37 – Soleira WES com paramento inclinado com caudal fixo: Evolução do caudal descarregado	65
Figura 38 – Soleira WES com paramento inclinado com caudal fixo: Dispersão dos valores de pressão	65

Figura 39 – Soleira WES com paramento inclinado com domínio reduzido: Configuração inicial	66
Figura 40 – Soleira WES com paramento inclinado com domínio reduzido: Configuração final	67
Figura 41 – Soleira WES com paramento inclinado com domínio reduzido: Dispersão dos valores de pressão	67
Figura 42 – Soleira WES com paramento inclinado com domínio reduzido e pressão específica: Configuração final	68
Figura 43 – Soleira WES com paramento inclinado com domínio reduzido e pressão específica: Dispersão dos valores de pressão	69
Figura 44 – Modelo de sensibilidade 3D: Configuração geométrica	70
Figura 45 – Modelo de sensibilidade 3D: Configuração final	71
Figura 46 – Modelo de sensibilidade 3D com caudal específico: Configuração final	72
Figura 47 – Alturas de escoamento no modelo computacional nos diferentes caudais nas secções 1 e 2	79
Figura 48 – Alturas de escoamento no modelo computacional nos diferentes caudais nas secções 3 e 4	79
Figura 49 – Alturas de escoamento no modelo computacional nos diferentes caudais nas secções 5 e 6	80
Figura 50 – Alturas de escoamento no modelo computacional nos diferentes caudais nas secções 7 e 8	80
Figura 51 – Alturas de escoamento no modelo computacional nos diferentes caudais nas secções 9 e 10	81
Figura 52 – Comparação entre os resultados do modelo físico e computacional: alturas de escoamento para o caudal de 896 m ³ /s nas secções 1 e 2	81
Figura 53 – Comparação entre os resultados do modelo físico e computacional: alturas de escoamento para o caudal de 896 m ³ /s nas secções 3 e 4	82
Figura 54 – Comparação entre os resultados do modelo físico e computacional: alturas de escoamento para o caudal de 896 m ³ /s nas secções 5 e 6	82
Figura 55 – Comparação entre os resultados do modelo físico e computacional: alturas de escoamento para o caudal de 896 m ³ /s nas secções 7 e 8	83
Figura 56 – Comparação entre os resultados do modelo físico e computacional: alturas de escoamento para o caudal de 896 m ³ /s nas secções 9 e 10	83
Figura 57 – Comparação entre os valores de pressão na soleira do DCC obtidos através dos modelos físico e computacional para Q = 2062 m ³ /s	87
Figura 58 – Comparação entre os valores de pressão na soleira do DCC obtidos através dos modelos físico e computacional para Q = 896 m ³ /s	88
Figura 59 – Comparação entre os valores de pressão na soleira do DCC obtidos através dos modelos físico e computacional para Q = 690 m ³ /s	88
Figura 60 – Comparação entre os valores de pressão na soleira do DCC obtidos através dos modelos físico e computacional para Q = 527 m ³ /s	89
Figura 61 – Comparação entre os valores de pressão na soleira do DCC obtidos através dos modelos físico e computacional para Q = 303 m ³ /s	90
Figura 62 – Comparação das velocidades nas diferentes secções para o caudal de 2062 m ³ /s	93
Figura 63 – Comparação das velocidades nas diferentes secções para o caudal de 896 m ³ /s	94

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Caudais e respetivas aberturas de comporta no modelo físico	30
Tabela 2 – Pressões para o caudal de 2062 m ³ /s no modelo físico	37
Tabela 3 – Pressões para o caudal de 896 m ³ /s no modelo físico	38
Tabela 4 – Pressões para o caudal de 690 m ³ /s no modelo físico	38
Tabela 5 – Pressões para o caudal de 527 m ³ /s no modelo físico	39
Tabela 6 – Pressões para o caudal de 303 m ³ /s no modelo físico	40
Tabela 7 – Alcance do jato para os diferentes caudais no modelo físico	41
Tabela 8 – Velocidades no modelo físico para o caudal Q = 2062 m ³ /s	41
Tabela 9 – Velocidades em modelo físico para o caudal Q = 896 m ³ /s	42
Tabela 10 – Soleira WES de paramento vertical:	
Caraterísticas genéricas da malha computacional	45
Tabela 11 – Soleira WES de paramento vertical: Características da malha do Bloco 2	46
Tabela 12 – Soleira WES de paramento vertical: Características da malha do Bloco 3	46
Tabela 13 – Soleira WES de paramento vertical:	
Valores da pressão para os 3 blocos de malha	49
Tabela 14 – Soleira WES com paramento inclinado:	
Características genéricas da malha de cálculo	53
Tabela 15 – Soleira WES com paramento inclinado:	
Características do bloco complementar de malha	53
Tabela 16 – Soleira WES com paramento inclinado: Resultados de pressão	56
Tabela 17 – Soleira WES com paramento inclinado e malha refinada:	
Características da malha	59
Tabela 18 – Soleira WES com paramento inclinado com velocidade inicial:	
Características da malha	62
Tabela 19 – Soleira WES com paramento inclinado com domínio reduzido:	
Malha de cálculo	66
Tabela 20 – Modelo de sensibilidade 3D: Malha de cálculo	71
Tabela 21 – Modelo de sensibilidade 3D com malha refinada:	
Características da malha	73
Tabela 22 – Modelo computacional: Malha de cálculo (1ª parte de cada simulação)	75
Tabela 23 – Modelo computacional:	
Malha de cálculo para determinação do alcance do jato	75
Tabela 24 – Comparação entre os caudais dos modelos físico e computacional	77
Tabela 25 – Valores de pressão em modelo computacional para os pontos de medição no fundo do DCC	85
Tabela 26 – Valores de pressão em modelo computacional para os pontos de medição laterais do DCC	85
Tabela 27 – Comparação do alcance máximo dos jatos para os modelos físico e computacional	90
Tabela 28 – Velocidades do modelo computacional para o caudal de 2062 m ³ /s	91
Tabela 29 – Velocidades do modelo computacional para o caudal de 896 m ³ /s	92
Tabela 30 – Comparação dos valores de velocidade obtidos para o caudal de 2062 m ³ /s	93
Tabela 31 – Comparação dos valores de velocidade obtidos para o caudal de 896 m ³ /s	94

Modelação numérica 3D de escoamentos em descarregadores de cheia.

Aplicação ao descarregador de cheias complementar do aproveitamento hidroelétrico da Caniçada.

LISTA DE ACRÓNIMOS

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
DDC	Descarregador de Cheias Complementar
EDP	Energias de Portugal
FAVOR	<i>Fractional Area/Volume Obstacle Representation</i>
GCG	<i>Generalized conjugate gradient</i>
GMRES	<i>Generalized minimum residuals</i>
HDC	<i>Hdraulic Design Criteria</i>
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
NMC	Nível de máxima cheia
NPA	Nível de pleno armazenamento
RANS	<i>Reynolds-averaged Navier-Stokes</i>
RNG	<i>Renormalization-Group</i>
RSB	Regulamento de Segurança de Barragens
SADI	<i>Spline alternating direction implicit</i>
SOR	<i>Successive over-relaxation</i>
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
USBR	<i>United States Bureau of Reclamation</i>
USDI	<i>United States Department of Interior</i>
VOF	<i>Volume of Fluid</i>
WES	<i>Waterways Experiment Station</i>
VC	Volume de Controlo

UNIDADES

cm	centímetro
GWh	GigaWatt hora
ha	hectares
hm ³	hectómetro cúbico
km	kilómetro
KV	kiloVolt
kW	kiloWatt

m	metro
m.c.a.	metros de coluna de água
m ²	metro quadrado
m ³	metros cúbicos
m ³ /s	metros cúbicos por segundo
MVA	megaVolt-ampere
r.p.m	rotações por minuto

SÍMBOLOS

D	Direita (relativo às tomadas de pressão laterais)
E	Esquerda (relativo às tomadas de pressão laterais)
H	Altura da lâmina de água acima da crista da soleira descarregadora
Hd	Altura de dimensionamento
i	Índice relativo à direção X
j	Índice relativo à direção Y
k	Energia cinética
k	Índice relativo à direção Z
L	Comprimento da zona de turbulência
p	pressão [N/m ²]
Q	Caudal
t	tempo [s]
t ₀	tempo inicial [s]
X	Direcção X
Y	Direcção Y
Z	Direcção Z
ε	Taxa de dissipação energética [modelo de turbulência k-ε]
ω	Taxa de dissipação específica [modelo de turbulência k-ω]
∂	Derivada parcial
u_i	Velocidade nas diferentes componentes
x_i	Posição nas diferentes componentes
ν	Viscosidade cinemática
ρ	Massa volúmica
€	Euro
(N)	Norte
(W)	Oeste

1

Introdução

No capítulo 1, que está dividido em 3 subcapítulos, é descrito o enquadramento do presente trabalho bem como a descrição dos objetivos e a estrutura que o referido trabalho vai apresentar.

1.1 ENQUADRAMENTO

Ao longo dos últimos 30 anos, as técnicas de modelação numérica desenvolveram-se enormemente. Com o aumento da potência computacional, a utilização de modelos numéricos tem, agora, aplicações variadas. De facto, o progresso havido nas técnicas de modelação levou ao uso generalizado da modelação numérica como uma ferramenta de projeto nas mais variadas disciplinas de engenharia (Chanel, 2008).

Tendo em vista a obtenção de resultados intermédios e/ou finais com graus de precisão consideráveis, em diferentes casos de estudo, a utilização da modelação numérica, nomeadamente em simulações no domínio da Dinâmica dos Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics*, CFD), tem um potencial a explorar, que cresce a cada dia com o avanço das tecnologias de cálculo e simulação (Casey e Wintergerste, 2000).

Na maioria dos modelos numéricos, as soluções numéricas obtidas são verificadas ou calibradas através de comparações com observações de campo ou experiências em modelo físico, antes de ser aplicado na prática (Chanel, 2008).

A Dinâmica dos Fluidos Computacional constitui um ramo da modelação numérica que tem vindo a ser desenvolvido para que seja possível a resolução de problemas que envolvam o escoamento de um qualquer fluido. Este ramo da modelação numérica inclui aplicações que envolvem a interação fluido-sólido, tais como o fluxo de água ao longo de um rio ou sobre estruturas hidráulicas. Existe, nomeadamente, um interesse considerável por parte dos engenheiros hidráulicos na aplicabilidade de CFD para modelar o escoamento de um fluido no circuito hidráulico de centrais de produção de energia hidroelétrica, e nas estruturas associadas aos correspondentes aproveitamentos hidráulicos. Tal poderá justificar a utilização de modelos CFD a três dimensões, que, mau grado requererem tempos de simulação significativos, possibilita a

obtenção de grandezas a 3 dimensões do escoamento, nomeadamente em torno de objetos curvos, o que não é verificável de obter em modelos mais simplificados, a 1 ou 2 dimensões (Chanel, 2008).

O presente estudo incidirá na utilização de modelos CFD para caracterização do escoamento ao longo de um órgão de descarga de uma barragem associado a um aproveitamento hidroelétrico.

A utilização de modelos numéricos para a resolução de problemas complexos no âmbito da Engenharia Hidráulica tem tido uma adesão crescente. A fase de projeto de uma estrutura hidráulica pode acarretar custos muito elevados. Por norma, para a obtenção de resultados com boa precisão as equipas de projeto recorrem a modelos físicos a escala reduzida. Estes modelos respeitam relações de semelhança que permitem, partindo de resultados anteriores, a correspondente extrapolação para o caso real. No entanto, dado os elevados custos destes modelos, desde cedo surgiu a necessidade de obtenção de resultados preliminares, mais rápidos, para que se possa estimar de forma primária o comportamento da estrutura. Para tal, surgiram métodos semi-empíricos que fornecem, inicialmente, respostas mais rápidas e menos dispendiosas, tendo no entanto uma menor precisão, o que poderá ter como consequência um acréscimo dos custos, nomeadamente pela (compreensível) adoção de margens de segurança, que, frequentemente, excedem a poupança oriunda na não recorrência a modelos físicos reduzidos (Andersson *et al*, 2013).

Os aspetos de segurança relacionados com barragens requerem, assim, muitas vezes, uma análise elaborada das condições de escoamento que podem ser obtidas, como referido, com recurso a simulações numéricas. Os modelos CFD podem fornecer uma alta precisão de cálculo a um custo menor relativamente aos modelos físicos por resolver numericamente o escoamento a nível tridimensional. No entanto, para que os modelos CFD possam constituir uma ferramenta fiável e credível, devem ser validados através de um certo número de situações físicas (Casey e Wintergerste, 2000).

1.2 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

Com a presente dissertação pretende-se avaliar a capacidade de simular o escoamento ao longo de um descarregador de cheias por simulação numérica, por comparação com a modelação física.

Para tal, foi considerado o caso específico do Descarregador de Cheias Complementar (DCC) do aproveitamento hidroelétrico de Caniçada, no Sistema Cávado. Para aferição dos resultados obtidos numericamente, será feita uma comparação com os resultados obtidos em modelo físico reduzido, realizado no âmbito do projeto do descarregador de cheias complementar, no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), em Lisboa.

Para o desenvolvimento do trabalho foi previamente escolhido e disponibilizado o modelo CFD Flow 3D, desenvolvido pela Flow Science, Inc.

Para o desenvolvimento da dissertação, objetivou-se também aferir a influência da definição/utilização de diferentes parâmetros numéricos na precisão de cálculo da modelação computacional, bem como sobre os tempos de cálculo e consequentemente capacidade computacional requerida.

A comparação e calibração do modelo computacional do caso do estudo é realizada com base na avaliação da distribuição de diferentes variáveis físicas do escoamento obtidas através da modelação numérica, a saber: as pressões em diferentes pontos da fronteira do escoamento, as velocidades em pontos e secções selecionados, a configuração da superfície livre do escoamento em diferentes secções e o alcance máximo do jato criado no final do descarregador.

Assim, e em termos específicos, a presente dissertação permitiu avaliar a capacidade do modelo CFD Flow 3D para simular o escoamento e analisar as suas características ao longo de um descarregador de cheias.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação encontra-se dividida em sete capítulos.

O primeiro (e atual) capítulo é respeitante à introdução e refere o enquadramento do trabalho e os principais objetivos do mesmo.

O segundo capítulo, que está dividido em dois subcapítulos, diz respeito à caracterização do caso de estudo, o Aproveitamento hidroelétrico da Caniçada e ao Descarregador de Cheias Complementar de Caniçada, respetivamente .

O terceiro capítulo é dedicado às características dos modelos CFD, aos seus princípios teóricos e ao modelo CFD Flow 3D.

O modelo físico é descrito no decorrer do capítulo 4, sendo apresentadas as condições de ensaio e a caracterização final do escoamento.

Ao longo do capítulo 5 são descritos os testes preliminares e de sensibilidade realizados. Estes testes têm por finalidade a perceção da influência de determinados parâmetros (como a dimensão da malha de cálculo, parâmetros físicos a ter em consideração na simulação numérica, etc.) na caracterização do escoamento. Essa perceção ajuda à otimização dos parâmetros a utilizar no modelo computacional aplicado ao caso de estudo e que será depois utilizado para o desenvolvimento das diferentes simulações numéricas para os diferentes caudais estudados.

No capítulo 6 é efetuada uma exposição do modelo computacional final do caso de estudo, bem como as características do escoamento (alturas de escoamento, pressões, alcance do jato e pressões) obtidas na simulação numérica e que posteriormente serão comparadas com as grandezas medidas em modelo físico reduzido. É também realizada uma análise comparativa entre os resultados obtidos na simulação em modelo físico e na simulação numérica.

Por fim, o último capítulo (7) diz respeito às conclusões gerais acerca do trabalho realizado e a recomendações para trabalhos futuros.

Complementarmente existem 5 anexos (referenciados de A a E), que contêm informação adicional à apresentada nos diferentes capítulos, de modo a complementar e/ou justificar diferentes considerações referidas ou desenvolvidas nos mesmos. O Anexo A apresenta os desenhos referentes à configuração final do DCC; o Anexo B corresponde aos estudos em modelo físico reduzido, contendo a caracterização do modelo físico e diferentes elementos de caracterização do escoamento no mesmo; o Anexo C apresenta os elementos complementares ao capítulo 5, que respeita a testes de sensibilidade e calibração; o Anexo D contém a descrição do modo de definição do modelo geométrico e alguns elementos que caracterizam o escoamento resultante da simulação numérica; o Anexo E contém elementos que complementam a discussão dos resultados obtidos, sendo complementar ao capítulo 7.

Modelação numérica 3D de escoamentos em descarregadores de cheia.

Aplicação ao descarregador de cheias complementar do aproveitamento hidroelétrico da Caniçada.

A barragem é de betão, do tipo abóbada de dupla curvatura, visível na Figura 2, tendo uma altura máxima de 76 m acima da fundação e um coroamento com 196 m de desenvolvimento total à cota (153,50). A albufeira tem uma capacidade total de cerca de 153 hm³ ao nível do pleno armazenamento (NPA definido à cota de 152,50). A Barragem de Caniçada é parte integrante do Sistema Hidroelétrico Cávado-Rabagão-Homem, explorado pela EDP Produção (Couto e Muralha, 2013).



Figura 2 - Barragem de Caniçada (vista de jusante para montante) (revista Visão, 2012)

O circuito hidráulico para produção hidroelétrica da barragem de Caniçada, visível na Figura 3, é constituído por uma central subterrânea em caverna, munida de dois grupos geradores, um edifício de comando e de descarga, que comunica com a central por um poço vertical, e por uma subestação contígua ao edifício de comando. Os caudais turbinados e os caudais descarregados são restituídos no rio Cávado, a jusante da barragem, os primeiros a cerca de 7 km da barragem, e os segundos junto desta. A central subterrânea situa-se junto à barragem, na margem direita do rio Cávado, também na freguesia de Valdozende. Para além do poço vertical, existe também uma rampa de acesso, utilizada essencialmente durante a construção e como recurso em eventuais situações de emergência. A central da Caniçada tem um quadro de pessoal permanente de 62 colaboradores. (EDP – Declaração Ambiental, 2011).

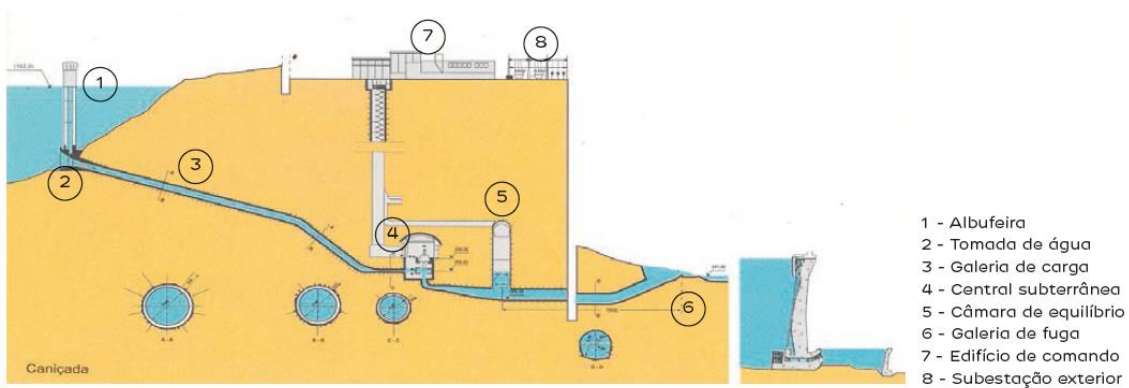


Figura 3 – Circuito Hidráulico da Barragem de Caniçada (EDP – Declaração Ambiental, 2011)

O descarregador de cheias original é implantado na parte central do corpo da barragem (visível na Figura 2), próximo do coroamento, sendo constituído por quatro orifícios retangulares equipados com comportas Stoney. A sua capacidade de vazão máxima é cerca de 1700 m³/s para o Nível de Máxima Cheia (NMC) definida no projeto original, situado à cota (153,00). O descarregador de cheias existente no corpo da Barragem tem como forma de restituição do caudal descarregado um jato livre. A dissipação de energia desse mesmo jato processa-se por meio do impacto no leito do rio e no colchão de água criado por um açude implantado, em planta, cerca de 100 m a jusante do corpo da barragem.

Entretanto, e no seguimento do estipulado no Regulamento de Segurança de Barragens (RSB) foram realizados estudos pela EDP Produção no âmbito do controlo da segurança hidráulico-operacional da barragem de Caniçada que foram concluídos em 2006. Esses estudos, que incluíram a revisão do estudo das cheias (com vista à fixação da nova cheia de projeto) e a análise da adequação dos órgãos de descarga, demonstraram a necessidade da construção de um novo descarregador de cheias, seguidamente designado por descarregador de cheias complementar. Os órgãos de segurança da barragem de Caniçada são neste momento constituídos apenas por um descarregador de cheias e uma descarga de fundo, pelo que para dar cumprimento ao novo RSB e às condições ideais de exploração foi tida em consideração a construção de um descarregador auxiliar (Couto *et al.* 2014).

2.2 CARACTERIZAÇÃO DO DESCARREGADOR DE CHEIAS COMPLEMENTAR

O projeto do Descarregador de Cheias Complementar (DCC) foi elaborado pela AQUALOGUS, sob a supervisão da EDP. Deste projeto surgiu uma solução que é constituída por um túnel escavado na encosta da margem esquerda (Figura 4 a), com capacidade máxima de vazão de 2062 m³/s, sob o Nível de Máxima Cheia (NMC), à cota (152,83). Na sua conceção foi considerada a garantia do adequado funcionamento hidráulico-estrutural da estrutura, bem como a consideração das condicionantes geológico-geotécnicas e de implantação, o que ditou a definição das formas originais de projeto



Figura 4 – DCC de Caniçada a) Implantação. b) Modelo reduzido (Couto *et al.*, 2014).

No sentido de validar o funcionamento das formas originais de projeto e de ajustar a sua geometria, foi conduzido um estudo em modelo hidráulico reduzido (Figura 4 b), construído no LNEC. Nos ensaios realizados no âmbito deste estudo foram tidas em conta: a análise do funcionamento conjunto do descarregador de cheias complementar com o descarregador já

O novo descarregador de cheias, a construir, compreende: uma estrutura de entrada, constituída por uma soleira WES (*Waterways Experimental Station*) e equipada com duas comportas de superfície, implantada na margem esquerda, a montante da zona do encontro da barragem; um túnel de geometria variável, localizado sob o encontro esquerdo da barragem, com cerca de 200 m de extensão; uma estrutura terminal em trampolim, como é visível na Figura 5 a).

A estrutura de entrada do descarregador é do tipo frontal, constituída por dois vãos iguais, com 8,75 m de largura cada um, separados por um pilar com forma hidrodinâmica em planta. Em cada um dos vãos, a soleira tem perfil do tipo WES com o paramento de montante inclinado a 1:1,5 (H:V), caracterizada por uma carga de dimensionamento de 12,50 m e crista à cota (138,50). Para o controlo do escoamento e fecho dos vãos do descarregador foi adotada a colocação de comportas do tipo segmento, manobradas por servomotores.



Ao longo de todo o túnel do descarregador, a secção transversal é dividida ao meio por um septo situado no prolongamento do pilar que separa os dois vãos da estrutura de entrada. No troço inicial, com cerca de 60 m, efetua-se a convergência da secção transversal, inicialmente com uma área cerca de 105 m² por vão até uma secção constante com cerca de 2 x 56 m².

À zona de convergência inicial segue-se uma secção em túnel, revestido a betão, com secção transversal constante. O referido túnel desenvolve-se aproximadamente entre as cotas de (134,30) e (98,35), numa extensão aproximada de 200 m (Couto *et al.*, 2014).

Em perfil, o túnel apresenta dois trechos retos com declives de 77% e 10%, concordantes por uma curva circular com 50 m de raio. Em planta, o túnel apresenta um eixo retilíneo.

A estrutura que se segue ao túnel é a parte terminal do descarregador, a céu aberto e que é constituída por um troço em canal com cerca de 60 m de extensão e que na parte inicial em perfil mantém as características do túnel e posteriormente, termina com uma estrutura em trampolim também esta dividida por um septo.

Com o objetivo de direcionar os jatos oriundos do descarregador para o leito do rio, no trecho final, o descarregador descreve uma curva em planta que termina com um ângulo máximo de 15° em relação ao eixo do túnel. Neste troço final, foi também prevista uma convergência dos muros laterais por forma a melhor direcionar e confinar o escoamento no final do descarregador. Daí resultaram as secções finais dos trampolins com 4,00 m de largura e lábios inclinados (Couto *et al.*, 2014).

O valor total da obra de construção do Descarregador de Cheias Complementar da Barragem de Caniçada é de 30 000 000 € (Revista Construção e Minas – nº 2, 2014).

Modelação numérica 3D de escoamentos em descarregadores de cheia.

Aplicação ao descarregador de cheias complementar do aproveitamento hidroelétrico da Caniçada.

3

Modelos CFD

No capítulo 3 da presente dissertação é apresentada a contextualização histórica dos modelos CFD (subcapítulo 1), o modelo numérico comercial considerado na realização do atual trabalho (subcapítulo 2) e os princípios teóricos dos modelos CFD bem como a formulação dos mesmos no modelo numérico utilizado, o *software* comercial Flow 3D (subcapítulo 3).

3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA

3.1.1 GÉNESE DOS MODELOS NUMÉRICOS

O uso de modelação numérica tem-se afigurado como prática comum no âmbito da engenharia de recursos hídricos e demais ciências que incidem o seu estudo sobre rios, lagos, estuários e zonas costeiras. Por exemplo, os modelos numéricos são comumente utilizados para averiguar os efeitos antropogénicos sobre o meio ambiente e para ajudar a fornecer medidas de mitigação avançadas contra eventos catastróficos, como inundações naturais e rotura de barragens. A implementação destes modelos em programas computacionais com um interface para utilizadores pessoais tornou a modelação numérica acessível à comunidade de engenharia em geral e, desde então, o seu uso foi mais abrangente. Os modelos computacionais, que têm como base diferentes modelos numéricos, são, no entanto, de utilização complexa e não trivial, na medida em que existe uma teoria específica adjacente aos modelos numéricos (Simões, 2015).

Os modelos *Computational Fluid Dynamics*, normalmente referenciados pelo seu acrónimo «CFD», constituem um tipo de modelos numéricos que tem por intuito a investigação e resolução de sistemas onde existam escoamentos, interações de fluidos, trocas energéticas e demais problemas relacionados com a Mecânica de Fluidos. Os modelos CFD têm por meio de resolução bases de simulação alicerçadas no poder de cálculo computacional. A correspondente metodologia recorre a equações governativas da mecânica de fluidos, tais como as equações de Navier-Stokes e as equações de continuidade, aplicando-as e resolvendo-as em cada célula computacional por forma a simular o escoamento (Robertson, 2014).

Os modelos CFD tiveram génese nas aplicações industriais e investigações académicas. Estes modelos tiveram a sua primeira utilização na engenharia de alta tecnologia, em áreas como a aeronáutica e astronáutica. No entanto, hoje em dia, esta metodologia é amplamente utilizada para

a resolução de problemas práticos complexos e que vêm complementar diferentes áreas da engenharia moderna (Jiyuan *et al.*, 2013). A aplicação destes modelos é atualmente diversificada e aplicada a diferentes problemáticas, tais como as apresentadas nas imagens a) e b) da Figura 6.

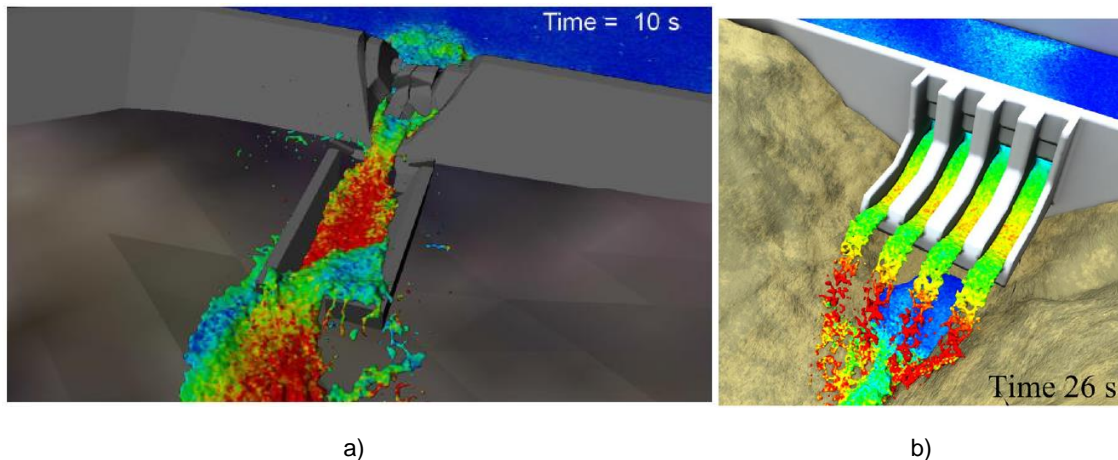


Figura 6 – Aplicações de modelos CFD **a)** Modelo de rotura de uma Barragem (Cleary *et al.*, 2015); **b)** Descarregador de corpo de barragem (Saunders *et al.*, 2014)

Os modelos CFD, tal como referido, derivam das disciplinas de mecânica dos fluidos e transferência de calor. Fruto dos avanços das pesquisas na área da modelação numérica, estes modelos desenvolveram-se no âmbito de outras áreas importantes e, até então, desconhecidas. Estas áreas inserem-se especialmente no âmbito do processamento químico, engenharia civil e ambiental. Os presentes modelos são utilizados para projeto, bem como para a melhoria de anteriores já existentes. Estes estudos permitem então melhorar a eficiência operacional e reduzir de forma significativa os custos associados à exploração de determinadas estruturas. Os estudos computacionais são atualmente comuns no âmbito da pesquisa e desenvolvimento de questões pertinentes relacionadas com as tecnologias de energia limpa e renovável, bem como para suplantar rigorosos desafios regulatórios, tais como o controlo das emissões e a redução substancial de poluentes ambientais. Os modelos CFD fornecem vantagens ao projetista em termos de tempo, custo e redução de recursos físicos utilizados (Jiyuan *et al.*, 2013; Saunders *et al.*, 2014).

Em retrospectiva, os modelos CFD tem evoluído de forma vertiginosa, integrando e interrelacionando não só as disciplinas de mecânica dos fluidos e a matemática, mas também a interação destas duas com as ciências da computação, tal como ilustrado no diagrama da Figura 7.

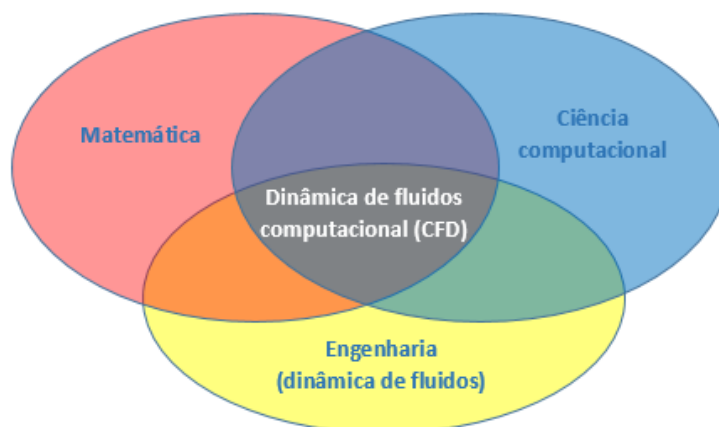


Figura 7 – Interdisciplinaridade dos modelos CFD (adaptado de Jiyuan *et al.*, 2013)

A mecânica de fluidos resume-se essencialmente ao estudo de fluidos, seja em movimento (hidrodinâmica) ou em repouso (hidrostática). Contudo os modelos CFD estão particularmente dedicados a estudos no âmbito de fluidos em movimento e na influência no comportamento do escoamento estudado de outros fenómenos tais como a transferência de calor e reações químicas em combustão de fluidos. Estes estudos estão bem patentes na terminologia CFD, *Computational fluid dynamics* - «dinâmica de fluídos computacional», numa tradução livre do termo. Adicionalmente, as características físicas do movimento do fluido podem ser, de forma geral, descritas através de equações matemáticas, geralmente em forma diferencial. A fim de resolver estas equações matemáticas foi possível, com recurso à programação de computadores e linguagem computacional de alto nível, a conversão dessas equações em programas de computador (Jiyuan *et al*, 2013).

A ciência da dinâmica de fluidos computacional (modelos CFD) é cada vez mais utilizada em alternativa à modelação física para a resolução de diversos problemas hidráulicos. Esta utilização mais frequente e generalizada da modelação numérica em detrimento da modelação física tem ligação ao facto de o estudo em modelo físico reduzido implicar, frequentemente, elevados custos monetários e bastante tempo para a obtenção dos resultados. Por exemplo, os modelos CFD foram utilizados para o cálculo do caudal em rios naturais por Olsen e Stokseth em 1995, o fluxo de sedimentos bem como a eficiência de retenção em filtros invertidos por Olsen e Skoglund em 1994 e o caudal descarregado num dado descarregador de cheia por Olsen e Kjellesvig em 2010. No entanto, as grandes barragens têm uma geometria complexa e, por conseguinte, os modelos físicos têm continuado a ser amplamente utilizados nestes casos, de modo a serem obtidos resultados de apoio ao projeto e exploração (Olsen e Kjellesvig, 1998).

O ponto de partida dos modelos numéricos utilizados nos diferentes modelos computacionais é, como já referido, o conjunto de equações básicas dos fenómenos de movimento. Como tal, são baseados na equação da continuidade, nos balanços de quantidade de movimento e quantidade de energia. Muitos são os fenómenos que são regidos por estas transferências de energia, sendo que se incluem por exemplo bombas, ventiladores, compressores na transferência de fluidos, retirada ou doação de calor e processos de separação na transferência de calor, agitadores no que respeita a transferência de massa, mudanças de fases, reações, movimentos mecânicos e, por sua vez, carga de vento em estruturas nas deformações de sólidos (Vianna Jr. *et al*, 2014).

3.1.2 PRINCIPAIS TRABALHOS DESENVOLVIDOS

Como revisão dos principais trabalhos realizados nesta área poder-se-ão apontar os seguidamente referidos, como mais marcantes nos últimos vinte anos nesta área de estudo e que foram validados pelos autores com bons níveis de aproximação em relação a valores experimentais:

- Thomas Molls e M. Hanif Chaudhry (1995) desenvolveram um modelo computacional para a simulação de um escoamento em superfície livre num canal, de profundidade média. Para a calibração de cada um dos casos de estudo foram comparados os resultados obtidos com os dados experimentais. A concordância obtida entre os modelos numéricos e os dados de campo foram considerados satisfatórios.
- Hung Le *et al.* (1997) desenvolveram uma simulação numérica direta de fluxo turbulento com recurso à programação das equações de Navier Stokes. Os autores destacaram a excelente concordância entre os resultados estatísticos com os dados experimentais.
- Olsen e Kjellesvig (1998) modelaram, em duas dimensões (2D) e três dimensões (3D), o caudal descarregado ao longo de um descarregador de cheia, com diferentes configurações. Foram resolvidas equações *Reynolds-averaged Navier-Stokes* (RANS)

com o modelo de turbulência $k - \epsilon$ e com uma malha de forma estruturada não ortogonal, obtendo-se bons níveis de aproximação.

- Yakun, *et al.* (1998) desenvolveram um estudo sobre a modelação numérica do caudal descarregado ao longo de um descarregador de cheia com queda livre, com descarga inicialmente desconhecida, em diferentes configurações. Foram obtidos dados acerca da descarga, configurações da descarga e distribuições de pressão nas paredes.
- Com o objetivo de verificar a aplicabilidade dos modelos CFD à fase de projeto de uma estrutura, Unami, *et al.* (1999) resolveram um modelo computacional de um descarregador de cheia em 2D. Foram utilizados uma malha triangular e ambos os métodos de elementos finitos e volumes finitos para a resolução das equações de modelação do escoamento. Além das equações de transporte, foi adicionado um modelo de emulsão de ar (*air entrainment model*). O estudo demonstrou a validade do modelo como ferramenta de análise preliminar para o projeto hidráulico.
- Song e Zhou (1999) apresentam uma abordagem numérica com o objetivo de simular e estudar o andamento da superfície livre ao longo de um descarregador em túnel. Recorreram ao método dos volumes finitos a fim de simular um fluido ligeiramente compressível, ao método *Large Eddy Simulation* (LES), a fim de simular a turbulência, e à média de tempo de superfície livre, com o objetivo de obter a configuração da descarga. A pressão e a velocidade de distribuição foram depois comparados com os valores medidos. Concluiu-se que a determinação da superfície livre, em 3D, pode ser muito mais eficiente para modelos com a consideração de um fluido ligeiramente compressível do que a abordagem mais comum, que considera o fluido incompressível.
- Savage e Johnson (2001) recorreram ao Flow 3D com o objetivo de comparar diferentes parâmetros do escoamento ao longo de um descarregador de cheia de soleira normal (WES), comparando resultados obtidos em testes em modelo físico, definido de acordo com as diretrizes de projeto do *United States Army Corps of Engineers* (USACE) e do *United States Bureau of Reclamation* (USBR). As simulações numéricas foram conduzidas considerando a semelhança de Reynolds e as equações de Navier-Stokes, que foram resolvidas através do método de volumes finitos. O estudo permitiu concluir que as ferramentas numéricas permitiram calcular a vazão e a pressão ao longo do descarregador.
- Teklemariam *et al.* (2002) estudaram a aplicação do Flow 3D a diversos casos do âmbito da engenharia hidráulica. Como resultado, a análise deste modelo CFD demonstrou capacidades notáveis no apoio ao projeto na área da engenharia hidráulica.
- Ho *et al.* (2003) simularam em 2D e 3D modelos de descarregadores por forma a aferir o seu comportamento em caso de elevação da cota de albufeira de uma barragem ao NMC. Os resultados foram validados por dados experimentais publicados *a priori*. Foi obtida uma boa concordância entre os dados numéricos e os dados experimentais existentes.
- Cleary e Prakash (2004) simularam a rotura de uma barragem de terra com um modelo computacional hidrodinâmico em superfície livre, estudando o escoamento em 3D e a onda de inundação.
- Kim e Park (2005) analisaram através do programa comercial Flow 3D o comportamento do escoamento ao longo de um descarregador WES utilizando a escala real e os efeitos de rugosidade. Foram resolvidas as equações RANS e foi usado modelo *Renormalization-group* (RNG) para o cálculo da turbulência. Os autores concluíram que (i) os erros numéricos, devido aos efeitos de rugosidade, foram insignificantes, e que, (ii)

caso a escala geométrica utilizada se situe no intervalo de 1/ 100 ou 1/ 200, os efeitos de escala do modelo têm já significado.

- Dargahi (2006) investigou o escoamento ao longo de um descarregador para simular o caudal descarregado com recurso a um modelo numérico tridimensional. Para calcular o caudal descarregado sobre o descarregador foi utilizado o modelo VOF (*Volume of Fluid*). O modelo de turbulência utilizado foi o modelo $k - \epsilon$. A energia cinética turbulenta (k) e taxa de dissipação (ϵ) foram obtidos a partir de dados experimentais.
- Johnson e Savage (2006) demonstraram a influência de diferentes parâmetros numéricos no andamento da superfície livre do escoamento sobre o descarregador. Esse trabalho é um complemento ao realizado anteriormente pelos mesmos autores em (Savage e Johnson, 2001), em que investigaram as condições de escoamento e compararam os resultados de estudos de testes físicos.
- Bhajantri, *et al.* (2006) descreveram a formulação e desenvolvimento de um modelo computacional bidimensional para o estudo do escoamento em superfície livre ao longo de um descarregador. O objetivo do estudo foi investigar as características hidráulicas do escoamento sobre o descarregador. As pressões, as velocidades e outros parâmetros hidráulicos não dimensionais, tais como o número de Froude e o índice de cavitação foram incluídos nessa análise. Foi também tida em consideração a taxa de compressibilidade do fluido. Os resultados numéricos demonstraram uma concordância razoável com os obtidos em modelos físicos.
- Jacobsen e Olsen (2010) investigaram a capacidade máxima de um descarregador de cheias complexo e consequentemente determinaram a curva de vazão do descarregador com recurso a um modelo CFD tridimensional. Foram utilizadas as equações RANS, com o método de diferenças finitas, com recurso a uma grelha ortogonal, e o modelo de turbulência $k - \epsilon$. Os resultados foram comparados com um estudo em modelo físico. O desvio entre os valores do caudal calculados e os medidos através da curva de vazão do descarregador foi inferior a 2% para a maior parte das descargas, ainda que chegando a 10% em casos pontuais. Como resultado do estudo, verificou-se que o uso de modelos computacionais para calcular a capacidade de vazão de um descarregador de cheia poderão levar a poupanças consideráveis em termos de financeiros para o projeto hidráulico.
- Zhenwei, *et al.* (2012) estudaram o escoamento ao longo de um descarregador através de um modelo computacional com recurso ao método *Volume of Fluid* (VOF). O escoamento no descarregador foi simulado com uma malha em forma de hexaedro e o modelo de turbulência utilizado foi o $k - \epsilon$. Os resultados oriundos da modelação numérica revelaram boa concordância com os resultados experimentais, em termos de parâmetros de escoamento, tais como a elevação da superfície livre, a pressão e a velocidade de escoamento.
- Morales, *et al.* (2012) analisaram o escoamento em superfície livre sobre crista do descarregador com recurso ao modelo VOF e ao modelo de turbulência $k - \epsilon$ para obter o perfil da superfície livre. Paralelamente foram realizados testes em modelos físicos e posteriormente comparados resultados com o modelo computacional. A maioria dos resultados da simulação numérica são concordantes com os obtidos através dos modelos físicos. O estudo mostrou, mais uma vez, a versatilidade dos modelos CFD no apoio ao projeto de estruturas hidráulicas.

- Daneshkhah e Vosoughifar (2012) trabalharam sobre os impactos de diferentes modelos de turbulência nos resultados referentes às características do escoamento para descarregadores de soleira normal com recurso ao *software* «Fluent». Os resultados obtidos nos modelos computacionais foram comparados com resultados experimentais. Foram utilizados o modelo RNG e o modelo de turbulência $k - \epsilon$, obtendo, neste caso, resultados mais precisos na crista do descarregador do que os resultados de anteriores modelos computacionais.
- Erfanain-Azmoudeh e Kamanbedast (2013) usaram o programa Flow 3D com vista à determinação ideal da localização adequada do sistema de arejamento de uma estrutura em túnel, para prevenir fenómenos de cavitação. O descarregador da barragem de Gotvand foi caso de estudo utilizado. Foram obtidos resultados para zonas de possível ocorrência de fenómenos de cavitação com recurso ao modelo computacional que foram posteriormente comparados com resultados em modelo físico. Esta comparação foi efetuada em diferentes localizações do descarregador. Os resultados numéricos foram validados com os dados publicados e a concordância obtida foi boa.
- Silva (2013) desenvolveu uma simulação numérica, com recurso ao *software* Flow 3D, de um descarregador de cheias com escoamento em superfície livre. Sendo o caso de estudo utilizado o Descarregador de Cheias Complementar (DCC) de Salomonde, a montante do atual caso de estudo. A simulação apresentou um comportamento bastante concordante com os resultados obtidos para o mesmo descarregador, construído em modelo reduzido.
- Tsai *et al* (2014) desenvolveram um modelo computacional para o estudo do comportamento do escoamento em bacias de dissipação de energia (*vertical drop pool*). Os resultados obtidos nos modelos computacionais foram comparados com um modelo físico reduzido, obtendo-se uma boa concordância entre os modelos.

3.2 FLOW 3D

O programa de cálculo utilizado no presente trabalho é o *software* comercial Flow 3D. O programa é descrito no *site* da «FLOW Science», empresa que desenvolve o produto, da seguinte forma:

“Produto multidisciplinar poderoso e altamente preciso, um instrumento CFD distribuído em todo o mundo desde 1985. FLOW 3D oferece aos engenheiros informações valiosas sobre muitos processos físicos de escoamentos, incluindo soluções acopladas do âmbito da transferência de calor. Estes recursos, combinados com TruVOF, o nosso avançado algoritmo projetado para calcular escoamentos de superfície livre, torna o software FLOW 3D um software de simulação ideal para a sua utilização em pesquisas, fase de projeto e para melhorar os processos de produção” (http://www.flow3d.com/home/products/Flow_3D/, consultado em Janeiro de 2015).

O FLOW 3D emprega algoritmos especialmente desenvolvidos para resolver as equações da mecânica dos fluidos. Uma variedade de opções físicas e numéricas permitem a aplicação do FLOW 3D a uma ampla variedade de situações, desde a transferência de calor e demais fenómenos de escoamento. O movimento de um fluido é descrito com equações não-lineares, transitórias e diferenciais de segunda ordem. A solução numérica destas equações envolve a aproximação dos diferentes termos com expressões algébricas. As equações resultantes desse processo são, em seguida, resolvidas para que se obtenha uma solução aproximada para o problema original. Este processo é denominado simulação (FLOW 3D Documentation, 2014).

O *software* FLOW 3D pode ser utilizado considerando diferentes soluções numéricas, correspondentes a diferentes casos limites das equações gerais de fluidos. Por exemplo, existe a opção de consideração de escoamentos compressíveis, correspondendo a uma solução e a opção de consideração de escoamentos puramente incompressíveis. Para o caso de fluido incompressível a densidade do fluido e a energia podem ser assumidas constantes e não precisam de ser calculadas, poupando tempo de cálculo. Os casos de escoamento em superfície livre, como o caso de estudo, podem ser analisados no modo de fluido incompressível. A opção de umas soluções numéricas em detrimento de outras correspondem a diferentes opções de resolução e simulação e poderão representar diferentes conjugações das equações de movimento.

Sendo embora usual o recurso à simulação numérica em escoamentos em superfície livre, será de referir que, no entanto, é um desafio modelar superfícies livres em qualquer ambiente computacional, dado que os parâmetros de fluxo e propriedades dos materiais, tais como a densidade, a velocidade de escoamento e a pressão têm uma fronteira de descontinuidade correspondente à superfície livre. No FLOW 3D, a inércia do ar adjacente ao líquido é desprezada, e o volume ocupado pelo ar é substituído com um espaço vazio, sem efeito de massa, representado apenas por pressão e temperatura uniforme. Esta abordagem tem a vantagem de reduzir o esforço computacional uma vez que na maioria dos casos, os detalhes relativos ao movimento do ar não são importantes para o movimento do líquido por este ser muito mais denso. A superfície livre é, como tal, uma das fronteiras externas do fluido em escoamento pelo que, desde logo, uma definição adequada do contorno da superfície livre é importante para uma obtenção adequada da dinâmica da superfície livre (FLOW 3D Documentation, 2014).

Seguidamente são expostos os princípios teóricos dos modelos CFD. Os diferentes modelos numéricos, programas de cálculo e/ou *software* comerciais padrão poderão recorrer a diferentes formulações dos diversos princípios teóricos dos modelos CFD. Além dos princípios teóricos são apresentadas, no ponto seguinte da presente dissertação, algumas das considerações específicas tidas pelo *software* Flow 3D.

3.3 PRINCÍPIOS TEÓRICOS

Os princípios fundamentais em que todos os modelos computacionais são baseados são semelhantes, apesar da grande diversidade de aplicações existente para a modelação numérica. Os problemas começam com um conjunto de equações diferenciais que descrevem os fenómenos físicos subjacentes à situação em causa. Para formular um conjunto de equações algébricas que representam as equações diferenciais parciais recorre-se a um tipo de método numérico, tal como a análise por elementos finitos e/ou método de volumes finitos. Após esta definição é encontrada, com recurso a uma solução iterativa ou matriz de cálculo, uma solução aproximada para as equações algébricas. Esta solução muitas vezes requer uma grande capacidade computacional, o que torna a utilização do poder computacional moderno tão importante para a utilização de modelos numéricos em previsões computacionais (Chanel, 2008).

Tipicamente, um modelo computacional começa com uma malha computacional, ou grelha. É constituída por uma série de elementos interligados, denominados de células. Estas células subdividem o espaço físico em pequenos volumes com vários “nós” associados. Os “nós”, encontros das fronteiras da malha, são usados para armazenar os valores das incógnitas, tais como pressão, temperatura e velocidade. A malha é, portanto, efetivamente o espaço numérico que substitui o espaço físico original.

3.3.1 MODELOS NUMÉRICOS

3.3.1.1 Método dos volumes finitos

O método dos volumes finitos é desenvolvido a partir da forma integral da equação da conservação. Um domínio é então dividido num número finito de volumes de controlo (VC) contíguos e a equação da conservação é aplicada a cada um desses volumes de controlo. No centro de cada um desses volumes localiza-se um nó computacional, no qual são calculados os valores das variáveis, sendo os valores das variáveis nas superfícies dos VC obtidos por interpolação em função dos valores nodais (centro do VC).

O método dos volumes de controlo pode ser aplicado a qualquer tipo de malha, adaptando-se portanto a geometrias complexas. A malha define apenas as fronteiras do volume de controlo e não necessita estar relacionada com um sistema de coordenadas.

A desvantagem do método de volumes finitos em relação ao método das diferenças finitas é o facto de métodos de segunda ordem (ou superiores) serem mais difíceis de desenvolver em 3D, com malhas não estruturadas. Isto é devido ao facto da aproximação por volumes finitos requerer três níveis de aproximação: interpolação, diferenciabilidade e integração (Gonçalves, 2007).

3.3.1.2 Método *Volume of Fluid*

No método *Volume of Fluid* (VOF), cuja primeira formulação foi avançada em 1970 por Hirt, Cook e Butler (Hirt *et al.*, 1970) e posteriormente compilada por Hirt e Nichols (C.W Hirt, B.D Nichols, 1981), são utilizadas funções de identificação para reconstrução da superfície livre. Essas equações assumem valores entre 0 e 1, dependendo da quantidade de fluido em cada célula ou volume de cálculo. A cada iteração, a superfície livre é reconstruída a partir das funções de identificação (Estacio *et al.*, 2006)

A principal vantagem do método VOF é a facilidade de obter a posição da superfície livre resolvendo apenas uma equação de transporte. O método recorre a um só sistema linear em velocidade e pressão, o que o torna facilmente computável. Este método revela-se robusto e eficaz na simulação de escoamentos não estacionários. A técnica VOF revela-se adequada a escoamento em superfície livre (Didier, 2007).

O método do VOF é utilizado no FLOW 3D. Este método é constituído em três componentes principais: a definição do volume de fluido função, um método para resolver a equação de transporte VOF e definir as condições de fronteira na superfície livre (FLOW 3D Documentation, 2014).

3.3.2 DOMÍNIO COMPUTACIONAL

3.3.2.1 Malha de Cálculo

A malha de cálculo fornece os meios para a definição dos parâmetros de fluxo em locais discretos, ajustando as condições geométricas e, naturalmente, o desenvolvimento de aproximações numéricas das equações de movimento de fluido. A abordagem do programa FLOW 3D é subdividir o domínio total do escoamento numa malha constituída por células retangulares (FLOW 3D Documentation, 2014).

Uma malha computacional caracteriza, portanto, o espaço físico. Deste modo, cada parâmetro de fluido está representado numa malha e corresponde a uma matriz de valores, caracterizando pontos discretos. Uma vez que os parâmetros físicos reais variam continuamente no espaço, quanto menor o espaçamento da malha, maior a precisão da simulação. Deste modo poderemos

enunciar a seguinte propriedade fundamental de uma aproximação numérica: para um mesmo tipo de malha, qualquer aproximação numérica válida aproxima-se tanto mais das condições originais quanto menor o espaçamento da grelha utilizada. Se uma aproximação não verificar esta propriedade, essa aproximação deverá então ser considerada incorreta. A redução do espaçamento da grelha, ou refinamento da malha, para os mesmos resultados de espaço físico é vantajoso a nível de precisão, mas no entanto aumenta a dimensão do modelo computacional e por consequência o tempo de cálculo do mesmo. Posto isto é necessário obter um compromisso entre a satisfação a nível de tempo de cálculo e a obtenção de soluções precisas por parte do utilizador.

Malhas retangulares são muais facilmente geradas e armazenadas devido à sua natureza regular ou estruturada. Um afastamento de malha não uniforme adiciona flexibilidade ao modelo computacional quando adotados domínios complexos em diferentes escoamentos também complexos. As células computacionais são numeradas de forma consecutiva por meio de três índices: i na direção X, j na direção Y e k na direção Z. Desta forma, cada célula de uma malha tridimensional pode ser identificada através de um único endereço (i, j, k), semelhante a coordenadas de um ponto no espaço físico.

A malha de cálculo define portanto o espaço computacional no qual incide o cálculo dos diferentes modelos numéricos para a realização das simulações (FLOW 3D Documentation, 2014).

3.3.2.2 Método FAVOR™

O método FAVOR™, um acrónimo de *Fractional Area/Volume Obstacle Representation*, oferece uma maneira simples e precisa de representar superfícies complexas no domínio computacional sem a necessidade de uma grelha que defina pontos em toda a fronteira do corpo ou objeto a estudar. A geometria do modelo computacional é incorporada na malha computacional adotada recorrendo ao cálculo de frações de área aberta nas faces da célula, juntamente com a fração de volume aberto e reconstrói a geometria com base nesses parâmetros. Este método é usado de forma exclusiva no *software* comercial Flow 3D e foi desenvolvido na década de 1980 no Laboratório Nacional de Los Alamos, no Novo México (Hirt e Nichols, 1981)

No entanto, o facto de este método se tratar de um método discreto, a eficiência deste método é afetada pela resolução da malha computacional adotada. Esta dependência da dimensão da malha computacional advém do facto de o pré-processador gerar frações de área de cada uma das faces das células do domínio computacional. Após gerar essas diferentes frações para cada uma das células o pré-processador determina quais os cantos da face da célula que estão contidas numa determinada área da geometria definida. Se todos os quatro cantos de uma face de uma célula estão no interior da geometria, toda a face é definida como estando dentro dessa mesma geometria. Da mesma forma, se todas as partes se encontram do lado de fora, toda a face é assumida como sendo integrante da geometria exterior. Quando apenas uma parte dos cantos de uma célula estão no interior da geometria, a interseção da geometria é calculada computacionalmente. Frações de área são então calculadas partindo desses pontos de interseção, sendo assumidas conexões em linha reta entre os pontos de intersecção da referida face. A suposição de uma ligação reta poderá introduzir um pequeno erro na fração de área. A aproximação é no entanto consistente com as outras hipóteses para o desenvolvimento das equações e melhora quanto maior o refinamento da malha de cálculo (FLOW 3D Documentation, 2014).

A implicação deste método numérico é a de que a precisão é tanto menor quanto maior a dimensão da célula, célula essa que é fruto do espaçamento adotado para a malha de cálculo. Um caso flagrante é o caso de uma qualquer parte de uma geometria que se estenda através de uma face de uma célula mas que não inclui nenhum canto dessa célula na sua face, não irá ser reconhecida

pela fração de área, como ilustrado para o círculo no canto inferior direito da Figura 8. Para algumas geometrias e resoluções de malha, é possível que a geometria possa intersectar uma face de uma célula mais do que uma vez. Neste caso, o limite da célula correspondente é assumida como estando na sua totalidade no interior do objeto ou, em antítese, inteiramente do lado de fora. A representação é tanto mais credível quanto maior a resolução da malha.

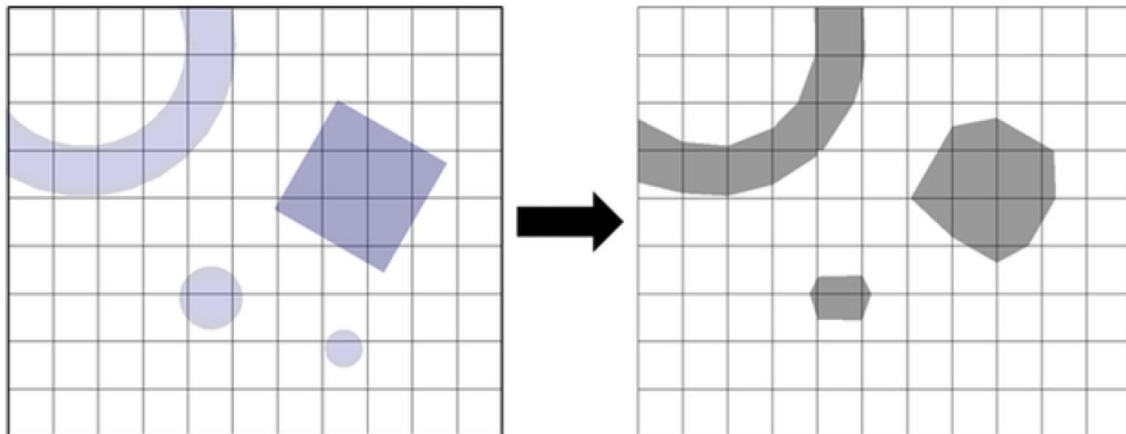


Figura 8 – Implicações do método FAVOR™. Definição do objeto (à esquerda) e objeto criado (direita) (FLOW 3D Documentation, 2014).

O método FAVOR™ aplica algoritmos especiais para o cálculo de áreas entre faces de célula, melhoramento da estabilidade numérica, cálculo da advecção de um fluido e a fadiga de materiais ao longo de limites sólidos. Os algoritmos do método FAVOR™ são executados na fase de pré-processamento de uma simulação e também a cada iteração se existir um movimento de objetos sólidos por ação do escoamento (FLOW 3D Documentation, 2014).

3.3.3 CONDIÇÕES INICIAIS E DE FRONTEIRA

As equações presentes no algoritmo do Flow 3D e que regem o movimento de um escoamento enquadram-se na categoria de problemas de valor inicial. Como tal, deve ser conhecida a solução para as diferentes fronteiras no momento inicial. Dado isto, é necessário o conhecimento à partida, da solução nos limites (condições de fronteira) e tempo inicial (condições iniciais) e, partindo desta definição das condições iniciais, poder-se-á calcular ao longo do tempo o desenvolvimento do escoamento (FLOW 3D Documentation, 2014). É necessário, portanto a definição rigorosa das condições de fronteira e condições iniciais.

3.3.3.1 Condições de fronteira

Para a resolução das equações do movimento, as condições de fronteira são preponderantes para a definição, a cada iteração, das condições de escoamento em cada limite do domínio computacional. Para analisar os diferentes problemas de fluxo, poder-se-ão definir uma variedade de condições de fronteira por forma a simular estas condições nos limites do domínio computacional (Towne *et al.*, 1990; Molls, 1992; Molls e Chaudhry, 1995).

O *software* de simulação numérica Flow 3D permite a definição de 10 condições de fronteira diferentes: pressão específica, caudal específico, escoamento, continuidade, simetria, parede, grade de sobreposição, condição periódica de fronteira, periódico e ondas.

- A condição de fronteira padrão é uma condição de «Simetria» (*Symmetric – S*). Esta condição garante assim uma condição de derivada zero no limite e uma condição de

velocidade zero na direção normal ao limite, sendo que existe portanto uma simetria na fronteira que não influencia o escoamento no interior do domínio computacional.

- Na condição «Escoamento» (*Outflow* – O) existe uma saída de todo o caudal que intersecta a fronteira do modelo computacional. Esta condição assegura a inexistência de perturbações na velocidade do escoamento principalmente em fluidos incompressíveis e com baixas velocidades, assegurando assim um limite de saída que não afeta a região computacional.
- De modo a se garantir também uma transição suave do escoamento junto das fronteiras, existe a condição «Continuidade» (*Continuative* – C). Esta condição, que é usada comumente, garante zero derivadas na direção normal ao limite em todas as grandezas, obtendo-se assim uma representação suave do fluxo através da fronteira.
- A condição Parede (*W* – *Wall*) garante condições de não deslizamento na fronteira, bem como uma condição de velocidade zero na direção normal ao limite.
- A capacidade para especificar uma condição de «Pressão específica» (*Specified pressure* – P) em uma ou mais fronteiras de uma região computacional é uma ferramenta importante e útil. O limite de pressão específica pode representar sistemas como por exemplo reservatórios, albufeiras de grandes dimensões ou condições de pressão decorrentes de dispositivos mecânicos. Geralmente, uma condição de pressão não pode ser utilizada em simultâneo com um limite em que as velocidades são também especificadas dado que as velocidades são influenciadas por gradientes de pressão.
- Uma condição de fronteira possível é a de «Caudal específico» que permite que se defina numa determinada fronteira o caudal a aduzir ao sistema. Esse caudal ou taxa de fluxo é distribuído de forma uniforme por toda a fronteira.
- A condição de fronteira oscilante possibilita a indução ao sistema de fenómenos ondulatórios através das fronteiras. Neste modo podem ser utilizados diferentes modelos tais como o gerador de ondas lineares periódicas (*Periodic* – Pd) e «Onda» (*Wave* – W) com gerador de ondas Stokes, gerador de ondas Stokes e Cnoidal (método de série de Fourier), gerador de onda solitária e gerador de ondas aleatórias.
- A condição de fronteira «Grade de sobreposição» (*Grid overlay* – G) permite o cálculo eficiente de grandezas em problemas em que a região de interesse é progressivamente crescente ou decrescente (por exemplo, uma explosão) (FLOW 3D Documentation, 2014).

3.3.3.2 Condições Iniciais

Um modelo computacional necessita da definição de condições iniciais de escoamento, fisicamente representativas do escoamento para o instante inicial, $t=t_0$. No entanto, nem sempre existe a informação correspondente à configuração inicial do escoamento para o momento inicial pelo que poder-se-á adotar como condição inicial uma solução estacionária de escoamento (Fortuna, 2000)

O Flow 3D permite a definição de dois tipos de condição inicial, a pressão hidrostática, o *restart* de uma simulação ou a região de fluido *restart*. A condição de pressão hidrostática permite a definição de regiões iniciais de fluido hidrostático. A condição de *restart* permite a definição para condição inicial de um novo modelo computacional a configuração final de um outro modelo tendo, no entanto, que esta região ser compatível com a geometria da simulação numérica em causa. Por fim, a condição região de fluido *restart* permite que uma nova região de fluido inicial

seja introduzida a fim de ser utilizada em cálculos de *restart*. Estas regiões permitem que se modifiquem as condições iniciais inserindo, por exemplo, uma bolha ou uma gota na solução (FLOW 3D Documentation, 2014).

3.3.4 EQUAÇÕES DO MOVIMENTO

No âmbito dos modelos CFD, duas das equações mais relevantes são as equações de continuidade e as equações de Navier-Stokes. Quando combinadas ambas as equações, é possível descrever o campo de pressões e velocidade de um determinado escoamento. Estas duas equações constituem portanto o sistema que descreve o escoamento de um fluido (Clohan, 2015; Petry, 2002).

3.3.4.1 Simulação Numérica Direta

Em fluidos newtonianos incompressíveis, as equações de conservação de massa, de quantidade de movimento e de energia podem ser descritas na seguinte forma (Petry, 2002):

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right], \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j T) = + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha \frac{\partial T}{\partial x_j} \right). \quad (3)$$

A abordagem de simulação numérica direta (*Direct Numerical Simulation*) parte então da resolução das equações (1), (2) e (3). No entanto esta simulação torna-se incomputável computacionalmente em simulações com um número maior de graus de liberdade, característicos de escoamentos turbulentos e correspondentes a números de Reynolds mais elevados (Neto, 2002).

No entanto, embora seja aceite que as equações de Navier-Stokes acopladas às equações da continuidade descrevem indistintamente escoamentos laminares e turbulentos, a solução destas equações ainda não é totalmente possível com os computadores atuais. De forma a suprimir esta limitação, para escoamentos com números de Reynolds elevados, recorre-se à consideração de modelos de turbulência e equações de Navier-Stokes que considerem a média de Reynolds, chamadas de “Equações médias de Reynolds”. Osborn Reynolds na década de 1880 desenvolve diversos trabalhos que permitem caracterizar o movimento turbulento através da separação dos escoamentos turbulentos em duas partes: uma parte média e outra flutuante. Estes trabalhos desenvolvidos evidenciaram experimentalmente a transição à turbulência e permitiram, através de propostas concretas, tratar matematicamente os escoamentos turbulentos.

3.3.4.2 Reynolds-averaged Navier-Stokes equations (RANS)

As equações de Navier-Stokes respeitantes ao escoamento em fluidos incompressíveis são representadas por:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_i) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu s_{ij}) \quad (5)$$

Onde o vetor s_{ij} , representante da taxa de deformação, é dado por

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

Pela aplicação da equação (4), a equação do movimento pode ser escrita como

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} \quad (7)$$

Em escoamentos turbulentos, as propriedades do meio passam a ser funções aleatórias no espaço e tempo. Assim, as variáveis de campo u_i e p devem ser expressas como a soma da média e partes variáveis como

$$u_i = U_i + u'_i, \quad p = P + p' \quad (8)$$

Onde as peças médias e flutuantes satisfazem

$$\overline{u_i} = U_i, \quad \overline{u'_i} = 0 \quad (9)$$

$$\overline{p} = P, \quad \overline{p'} = 0 \quad (10)$$

Onde a barra indica a média temporal.

Inserimos a equação (5) em (6) - (7) e tomar a média de tempo para chegar ao Reynolds média de Navier-Stokes (RANS) equações

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (11)$$

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (U_i U_j) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu S_{ij} - \rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (12)$$

Onde S_{ij} é o tensor taxa de deformação média

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (13)$$

A quantidade $\tau_{ij} = -\overline{u_i u_j}$, conhecida como o tensor de Reynolds que é simétrica e, assim, tem seis componentes. Através da aplicação de (11), a equação (12) pode então ser expressa como

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} \quad (14)$$

Ao serem decompostas as propriedades instantâneas em partes média e flutuante, introduzem-se três incógnitas. Contudo, não existe o ganho de equações adicionais, o que significa que o sistema não está ainda fechado. Para fechar o sistema, tem de ser encontradas as restantes equações para a resolução das correspondentes incógnitas. No que se segue, descreve várias abordagens (modelos de turbulência) para resolver as equações RANS (Nguyen, 2005).

3.3.5 MODELOS DE TURBULÊNCIA

A turbulência é o movimento caótico e instável de fluidos que ocorre quando há insuficiente estabilização das forças viscosas. Para sistemas com número de Reynolds elevado, as instabilidades naturais que ocorrem dentro do fluxo não são amortecidas pela viscosidade da água e manifestam-se na formação de turbilhões de diferentes dimensões. Idealmente, seria proveitoso simular os fenómenos de turbulência, no entanto dado as características destes fenómenos isso apenas é possível se a malha for refinada o suficiente para captar esse fenómeno. Contudo, isso geralmente não é possível devido à memória finita do computador e a limitações de tempo de processamento. Portanto, existe a necessidade de recorrer a uma abordagem simplificada do fenómeno que descreve os efeitos da turbulência sobre as características médias do escoamento.

No FLOW 3D, existem seis modelos de turbulência disponíveis: o modelo do comprimento de mistura de Prandtl, modelos com uma equação de transporte, modelos com duas equações de transporte: $k - \epsilon$, RNG, e $k - \omega$ e o modelo de simulação em grandes escalas, *Large Eddy Simulation*, LES. A formulação utilizada no FLOW 3D é, no entanto, um pouco diferente de outras formulações, pois este *software* recorre ao método FAVORTM que trata a influência das diferentes frações de área/volume generalizando a produção turbulenta, associando a esta também as forças de flutuação. Esta última generalização inclui, por exemplo, os efeitos de flutuação associados a acelerações não-inerciais (FLOW 3D Documentation, 2014).

3.3.5.1 Modelo do Comprimento de Mistura de Prandtl

Este modelo foi proposto por Prandtl em 1925 como modelo de comprimento de mistura (*mixing length model*).

No modelo de Prandtl, considerando que o escoamento médio ocorre apenas na direção longitudinal e que as variações de velocidade longitudinal ocorre apenas na direção transversal perpendicular ao desenvolvimento do canal, o coeficiente a utilizar na equação de resolução da equação de turbulência, denominada analogia de Reynolds, é dado através da formulação de Prandtl e tem como variável L (comprimento da zona turbulenta ou de mistura). O comprimento de mistura representa de alguma forma a dimensão dos vórtices característicos do escoamento sendo menores perto das fronteiras físicas e maiores quando afastados das fronteiras. Assim a

forma de se especificar L depende do tipo de escoamento considerado, sendo diferente para tubos, canais, jatos, camadas limites, entre outros.

Uma limitação deste modelo consiste no facto de que produz resultados aceitáveis apenas em escoamentos com um comprimento característico único, como no caso de escoamentos turbulentos desenvolvidos plenamente em canais de grande largura, onde o comprimento característico é a profundidade do canal ou escoamento em tubos, com comprimento característico igual ao diâmetro. Em problemas com mais de uma dimensão característica a determinação de L torna-se complicada e o modelo raramente é usado (Odier *et al*, 2009).

3.3.5.2 Modelos com uma equação de transporte

O modelo de turbulência com uma equação de transporte consiste na adoção de uma equação de transporte para a representação da energia cinética específica associada a flutuações de velocidade e de turbulência no escoamento (a energia cinética turbulenta). Este método recorre ao cálculo da intensidade turbulenta no sistema através do cálculo *a priori* da energia cinética média da massa presente no domínio, função do volume total do domínio. Posto isto, a equação de transporte inclui a convecção e difusão da energia cinética turbulenta, a produção de energia cinética turbulenta devido ao corte e efeitos da flutuabilidade, difusão e dissipação devido a perdas viscosas dentro dos vórtices turbulentos. Os fenómenos de flutuabilidade só ocorrem caso se verifique uma densidade não uniforme no escoamento e inclui os efeitos da gravidade e os efeitos das acelerações não-inerciais (FLOW 3D Documentation, 2014).

3.3.5.3 Modelos com duas equações de transporte: $k - \epsilon$

O modelo padrão $k - \epsilon$ é um modelo semi-empírico baseado em equações de transporte para a turbulência de energia cinética « k » e sua taxa de dissipação « ϵ ». O modelo de equação de transporte « k » é derivado a partir da equação exata (modelo de uma equação), enquanto a taxa de dissipação para o modelo, « ϵ », foi obtida através de raciocínio físico.

Na derivação do modelo $k - \epsilon$, é assumido que o escoamento em causa é completamente turbulento e que os efeitos oriundos da viscosidade molecular são insignificantes para os resultados finais. O modelo padrão $k - \epsilon$ é, portanto, válido apenas para os fluxos totalmente turbulentos (Nguyen, 2005).

3.3.5.4 Modelos com duas equações de transporte: RNG

Um outro modelo de turbulência é baseado em métodos do grupo da re-normalização «*Renormalization-Group* (RNG)». Esta abordagem recorre a métodos estatísticos para a derivação das equações médias e obtenção de quantidades de turbulência, como a energia cinética turbulenta e sua taxa de dissipação.

O modelo RNG utiliza equações semelhantes às equações presentes no modelo de turbulência $k - \epsilon$. No entanto, as constantes das equações que no modelo padrão $k - \epsilon$ são obtidas de forma empírica, são no caso do modelo RNG derivadas explicitamente. Geralmente, o modelo RNG tem uma aplicabilidade mais ampla quando comparado com o modelo padrão $k - \epsilon$. Em particular, o modelo de RNG é conhecido por descrever de forma mais conseguida os escoamentos de baixa intensidade de turbulência e obter resultados com maior grau de precisão em escoamentos que apresentem regiões de cisalhamento fortes entre diferentes partes do domínio.

Um desafio numérico específico de ambos os modelos de duas equações $k - \varepsilon$ e RNG é a necessidade de limitar o valor mínimo da equação ε (taxa de dissipação). A equação pode produzir valores de ε muito próximos de zero e embora fisicamente se deva aproximar de zero, por razões numéricas este caso pode não ser possível. Por estas razões, este valor poderá ser limitado automaticamente quando se dá o caso de a convergência ser muito lenta (FLOW 3D Documentation, 2014).

3.3.4.5 Modelos com duas equações de transporte: $k - \omega$

O modelo $k - \omega$ é um dos modelos de turbulência mais utilizados. É um modelo de duas equações, o que significa, que, tal como os modelos $k - \varepsilon$ e RNG, inclui duas equações de movimento, para representar as propriedades turbulentas do escoamento. Isso permite que um modelo de duas equações possa representar de forma conveniente fenómenos como a convecção e a difusão de energia turbulenta.

A primeira variável, na semelhança do modelo $k - \varepsilon$, diz respeito à energia cinética turbulenta, variável representada por « k ». A segunda variável do presente modelo diz respeito à dissipação específica e é representada pela letra grega ω (ómega). Esta segunda variável « ω » é a variável que determina a escala de turbulência no estudo, enquanto a primeira variável « k » determina a energia da turbulência ocorrida no caso de estudo (http://www.cfd-online.com/Wiki/K-omega_models, visto em Julho de 2014).

3.3.5.6 Large Eddy Simulation, LES

O modelo de turbulência *Large Eddy Simulation* (LES) surgiu maioritariamente de esforços oriundos do ramo da modelação no âmbito de estudos atmosféricos. A ideia básica do modelo LES é a de que se deve calcular diretamente todas as estruturas do escoamento turbulento, estruturas estas que serão calculadas nó a nó e que podem ser resolvidas pela malha computacional aplicada ao caso de estudo. Para cada nó da malha o cálculo deve somente aproximar as requeridas características de turbulência visto que são valores demasiado pequenos. Quando se utiliza o modelo de LES, é importante lembrar que o modelo é intrinsecamente tridimensional e os resultados oriundos deste, são dependentes do tempo de cálculo disponível. Além disso, as flutuações devem ser inicialmente introduzidas e/ou dever-se-á indicar os limites de vazão para o cálculo. Embora este método necessite de mais esforço e capacidade de cálculo por parte do equipamento, devido ao cálculo mais pormenorizado (em cada ponto da malha), este possibilita a obtenção de informações mais precisas do que as produzidas por modelos baseados na média de Reynolds (ou seja, os modelos anteriormente mencionados). Por exemplo, quando os referidos modelos LES são aplicados e utilizados para o cálculo de escoamentos turbulentos em torno de grandes edifícios, os resultados obtidos não se restringem apenas às tensões de vento instaladas numa superfície, mas fornecem também resultados que têm em conta uma estimativa da magnitude e desvio padrão de flutuações de força associados a esse escoamento turbulento aplicado no edifício (FLOW 3D Documentation, 2014).

3.3.6 GMRES PRESSURE-VELOCITY SOLVERS

Atualmente existem métodos de resolução de equações de movimento e turbulência muito complexos e às quais muitos programas de simulação numérica recorrem. O GMRES é um exemplo destes modelos.

O método do mínimo residual generalizado (*generalized minimum residuals*) conhecido também pelo acrónimo de GMRES, foi sugerido no ano de 1986 por Saad and Schultz. A teoria base do método GMRES e na sua forma de resolver problemas é a iteração de Arnoldi. A ideia principal do método GMRES é a resolução de um problema de mínimos quadrados a cada passo da iteração, desenvolvendo uma solução mais precisa quando comparada com a anterior. O esforço de cálculo para o algoritmo GMRES depende muito do tipo de algoritmo utilizado para a resolução do problema dos mínimos quadrados e que da iteração Arnoldi (Fasshauer, http://www.math.iit.edu/~fass/477577_Chapter_14.pdf).

Atualmente, novos métodos de resolução de problemas de pressão e de velocidade têm vindo a ser implementados no *software* FLOW 3D. Além do método de cálculo GMRES, existe um novo algoritmo opcional, chamado “gradiente generalizado conjugado” (*generalized conjugate gradient*), GCG. Este algoritmo também foi implementado no código do *software* com o objetivo de resolver termos de equações relacionados com forças viscosas, sendo parte do último procedimento de cálculo do GMRES. Esta nova forma de resolução constitui um método altamente preciso e eficiente para uma ampla gama de problemas. Possui boas propriedades e bons níveis de convergência, simetria e velocidade. Além das vantagens enunciadas, este método não necessita de recorrer a mais memória do que os métodos mais tradicionais como o SOR (*Successive over-relaxation*) ou SADI (*Spline alternating direction implicit*). (FLOW 3D Documentation, 2014).

Modelação numérica 3D de escoamentos em descarregadores de cheia.

Aplicação ao descarregador de cheias complementar do aproveitamento hidroelétrico da Caniçada.

4

Ensaaios em Modelo Físico

No decorrer da elaboração da presente dissertação, foi efetuada uma campanha de medições em modelo físico reduzido do descarregador de cheias complementar da barragem de Caniçada. O correspondente modelo foi construído no LNEC no âmbito de estudo realizado para a EDP Produção. A referida campanha teve como objetivo a recolha de dados para posterior calibração do modelo computacional e aferir a validade dos resultados obtidos.

Os ensaios em modelo físico foram desenvolvidos no LNEC após a fase de estudos para a definição das formas propostas do descarregador complementar da barragem de Caniçada, a determinação da curva da vazão do descarregador complementar e a análise das diferentes regras de exploração. A campanha de medições realizada no âmbito da presente dissertação é reportada na Nota Técnica do LNEC (Muralha *et al.* 2014). Os ensaios realizados foram perspetivados e permitiram enquadrar a caracterização de perfis transversais do escoamento ao longo do descarregador complementar, a medição de velocidades em zonas específicas do escoamento, a caracterização das alturas do escoamento em diferentes secções e das pressões desenvolvidas ao longo do canal, e a avaliação do alcance dos dois jatos de saída.

Para tal, e mais especificamente, foram realizadas medições de diferentes grandezas: Alturas de escoamento em diferentes secções do descarregador; Pressão, através de piezómetros localizados em diferentes pontos ao longo do descarregador; Velocidades, na zona de entrada do novo descarregador de cheias e na estrutura terminal; e Alcance máximo dos jatos.

As medições descritas no presente capítulo constituem um valor incomensurável para a validação do modelo computacional pois constituirão, como anteriormente referido, termo de comparação para os resultados obtidos na simulação numérica.

4.1 CONDIÇÕES DE ENSAIO

No Anexo B.1 são patentes as características gerais do modelo físico estudado. São referidas as informações respeitantes à dimensão total, escalas utilizadas, tipo de semelhança física, além de outras considerações específicas.

4.1.1 CAUDAIS REPRODUZIDOS

Para viabilizar as medições de alturas de escoamento no interior do túnel, foi necessário retirar a parte superior do descarregador (corporizado, no modelo, por uma cobertura materializada por tubagem em acrílico) com o objetivo de ser possível aceder ao (e melhor visualizar o) escoamento nessa zona. Como tal, foi necessário proceder à limitação dos caudais a ensaiar para que não fossem atingidas as cotas superiores dos muros laterais do túnel. O caudal máximo ensaiado para esse efeito foi, assim, de 896 m³/s.

Em todos os ensaios foi mantido o nível de água na zona de aproximação no valor correspondente ao NPA da albufeira, à cota (152,5). Os caudais dos ensaios realizados no modelo, as respetivas aberturas das comportas e os caudais correspondentes no protótipo são patentes na Tabela 1. Dos cinco caudais indicados, e de acordo com o antes referido, apenas quatro foram utilizados para medição das alturas de escoamento: $Q = 896 \text{ m}^3/\text{s}$, $690 \text{ m}^3/\text{s}$, $527 \text{ m}^3/\text{s}$ e $303 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabela 1 – Caudais e respetivas aberturas de comporta no modelo físico

	Caudal de projeto	Caudal 1	Caudal 2	Caudal 3	Caudal 4
Q modelo (l/s)	66,6	29,6	22,8	17,4	10,0
Abertura da comporta (m)	totalmente aberta	5,3	4,0	3,0	1,5
Q protótipo (m ³ /s)	2062	896	690	527	303

Quanto ao caudal máximo, o caudal de projeto de 2062 m³/s, foi utilizado antes da retirada da referida cobertura da zona em túnel para a realização de um ensaio com a configuração de base, no qual se obtiveram valores para o alcance do jato e das pressões ao longo do descarregador (Couto *et al.*, 2013).

4.1.2 SECÇÕES DE ESTUDO

A secções e/ou pontos de estudo não são iguais para todas as grandezas medidas. Foram efetuadas medições de altura de escoamento em 10 secções, pressões em 16 pontos na base do vão esquerdo do descarregador, pressões nas paredes laterais nas 20 tomadas de pressão disponíveis, quando atingidas pelo escoamento e velocidades em 6 secções.

A definição das diferentes secções de estudo foi efetuada com base na avaliação da acessibilidade para a realização das medições e da possibilidade de inclusão de singularidades do escoamento. O fator relativo à acessibilidade está ligado à necessidade de garantir o alcance do equipamento de medição a todos os pontos de cada secção em estudo. Optou-se ainda pela sobreposição de secções com instalação prévia de tomadas de pressão. Por fim, foram também consideradas no estudo outras secções, por corresponderem a pontos notáveis do escoamento que pudessem traduzir pontos de alturas máximas/mínimas, etc..

O estudo compreendeu assim uma campanha de medições de alturas de escoamento abrangendo 10 perfis transversais. As quatro primeiras secções são localizadas na parte interior do descarregador em túnel e as restantes seis secções estão localizadas na zona próxima da saída do descarregador, onde o escoamento apresenta variações mais significativas. As secções de medição de alturas de escoamento (secções 1 a 10) e os pontos de tomadas de pressão (pontos 1 a 16 e 1D/E a 10D/E) são as representadas na Figura 9. Em cada secção de estudo foram obtidas as alturas de escoamento em 8 pontos, 4 em cada vão. Ao longo de todo o estudo foram tidas em consideração sempre as mesmas secções bem como os pontos de medição de pressão.

Na Tabela B 1 do Anexo B, são apresentadas as distâncias dos pontos de medição em relação ao septo central.

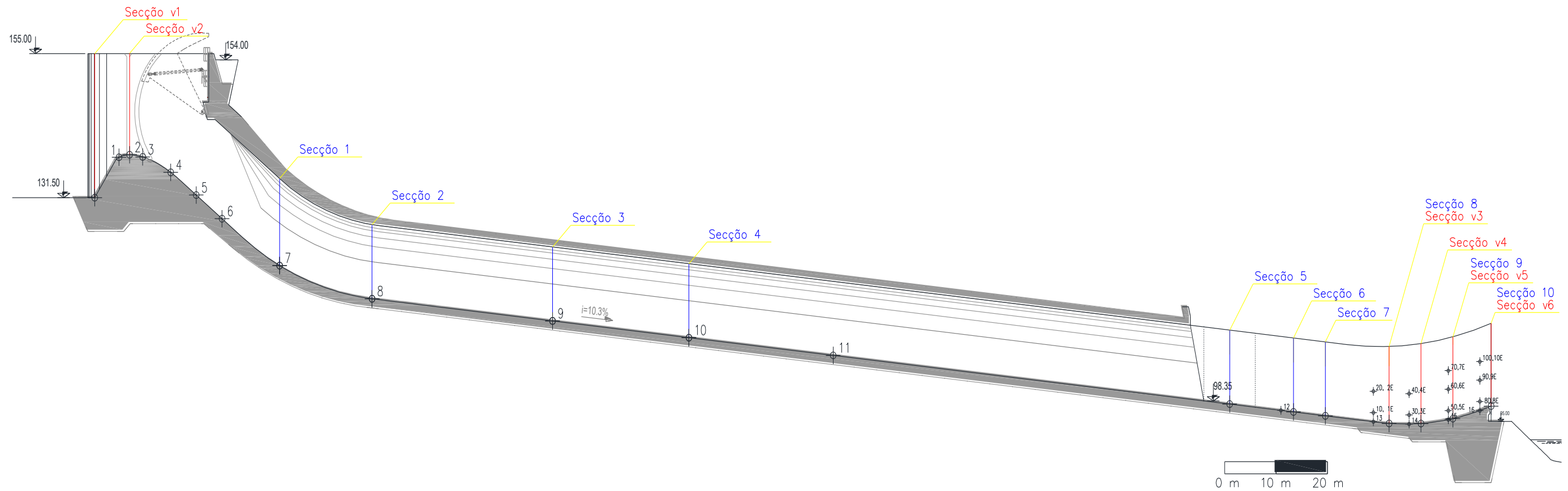


Figura 9 - Localização das secções de medição e tomadas de pressão (A. Muralha *et al.*, 2014).

Modelação numérica 3D de escoamentos em descarregadores de cheia.

Aplicação ao descarregador de cheias complementar do aproveitamento hidroelétrico da Caniçada.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO AO LONGO DO DESCARREGADOR

4.2.1 ALTURAS DE ESCOAMENTO

Neste subcapítulo é apresentada e caracterizado o aspeto da superfície livre do escoamento nas diferentes secções de estudo, para os diferentes (4) caudais estudados. Para cada secção os perfis apresentados resultam da interpolação dos 4 valores das alturas de escoamento medidos na mesma secção, para os diferentes caudais em estudo (ver Anexo B2, onde são apresentadas as tabelas representativas das alturas de escoamento). Como já antes referido e justificado (em 4.1.1), não foi possível realizar a medição de alturas ao longo do canal para o caudal de projeto.

Na série conduzida para medição de alturas de escoamento, o primeiro caudal ensaiado foi o de 896 m³/s. Na Tabela B2 do Anexo B.2 são apresentadas as alturas de escoamento para o referido caudal. Os perfis de alturas de escoamento são obtidos da interpolação dos valores medidos em cada secção encontra-se representada a cor vermelha, nas respetivas secções, nas Figura 10 a 14.

Dado que os valores de altura de escoamento obtidos para o vão direito do descarregador não divergem de forma significativa em relação aos valores obtidos para o vão esquerdo, o aspeto da superfície livre do escoamento apresenta de um modo geral simetria em relação ao septo central do DCC, com exceção das secções presentes na fase final (estrutura de saída) do descarregador. Esta simetria é registada em todos os caudais ensaiados, sendo mais notória entre as secções 1 a 7.

No segundo caudal ensaiado, correspondente a 690 m³/s, as alturas de escoamento obtidas, que se encontram representadas a cor azul nas respetivas secções transversais (Figuras 10 a 14), são apresentadas na Tabela B3 do Anexo B.2.

Os valores medidos no decorrer do referido ensaio em cada secção são, naturalmente, e de um modo geral, inferiores aos obtidos para o caudal de 896 m³/s. Esta característica é também observada para os caudais de 627 e 303 m³/s.

O terceiro e quarto ensaio realizado foram conduzidos com um caudal de 527 m³/s e 303 m³/s. Os resultados obtidos para os valores das alturas de escoamento nas diferentes secções de estudo são os presentes no Tabela B4 e B5 do Anexo B.2 e encontram-se representados graficamente a cor amarela e verde, respetivamente, nas secções transversais correspondentes, nas Figuras 10 a 14. (Muralha *et al.*, 2014).

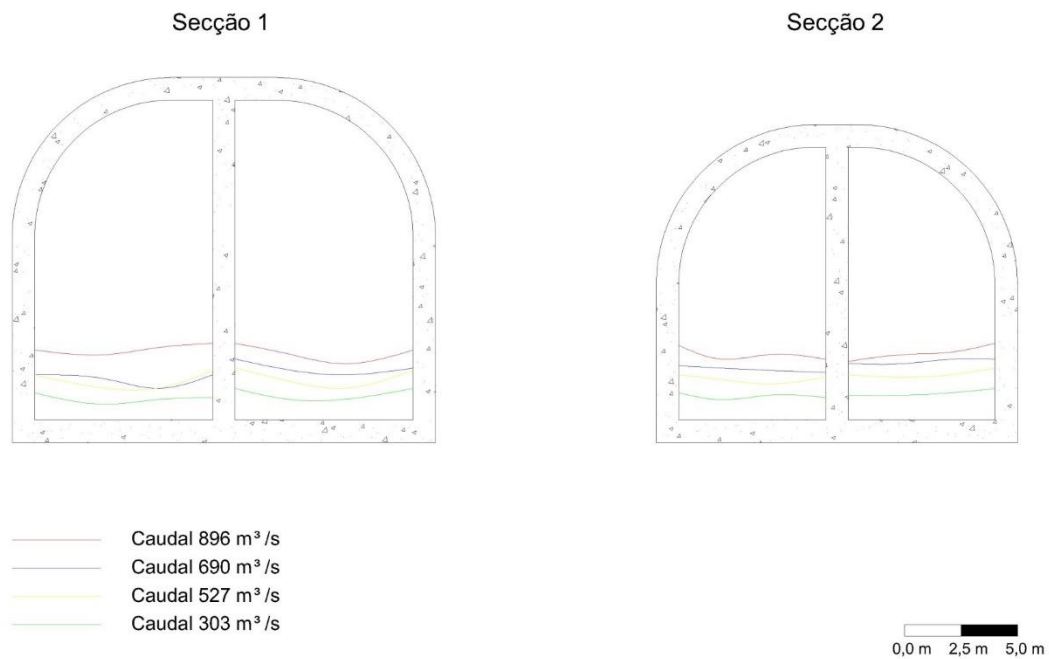


Figura 10 – Alturas de escoamento no modelo físico nas secções 1 e 2

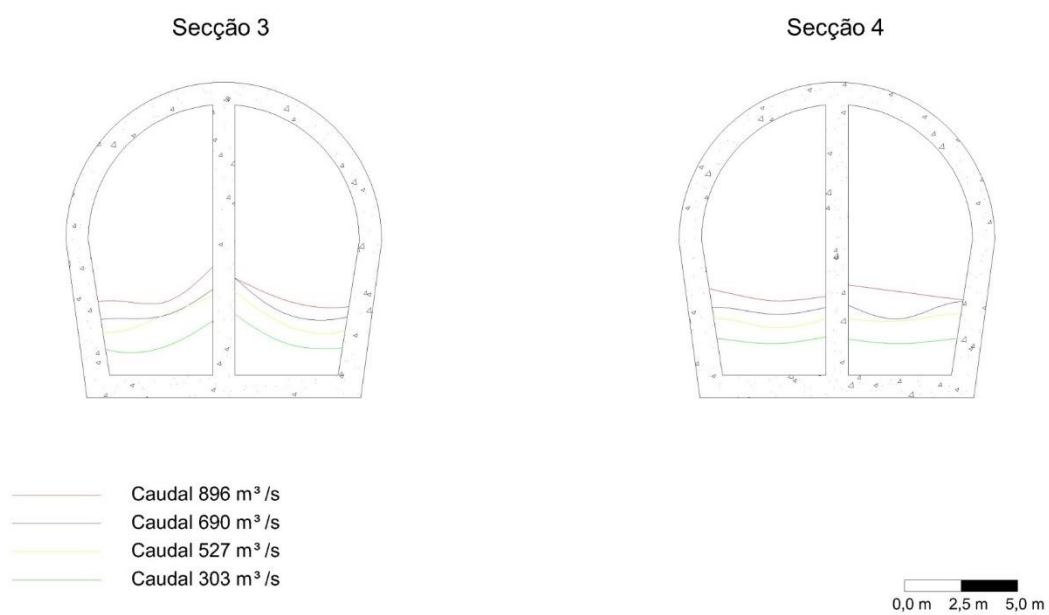


Figura 11 – Alturas de escoamento no modelo físico nas secções 3 e 4

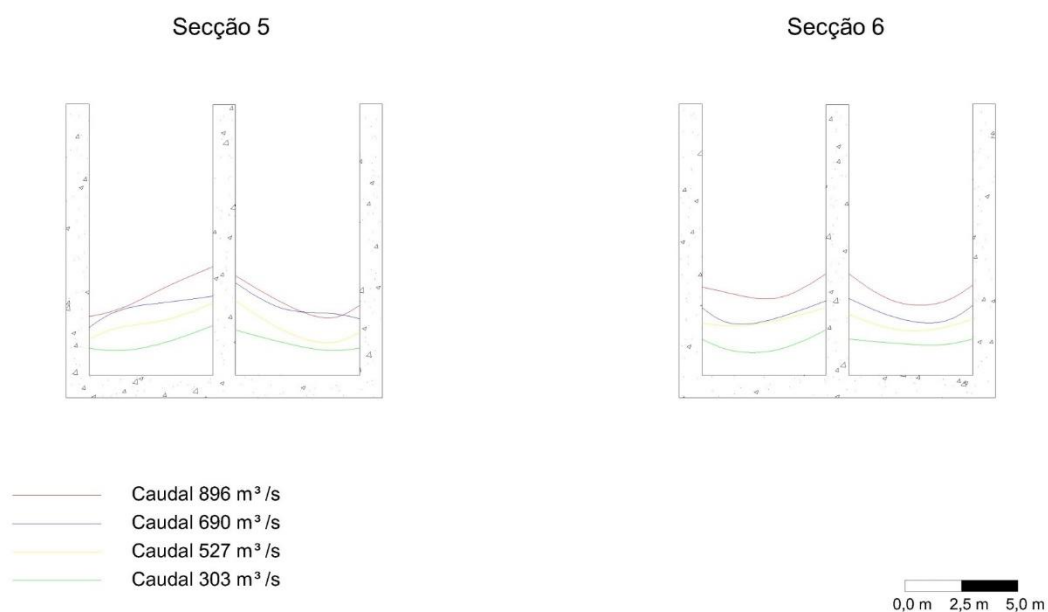


Figura 12 – Alturas de escoamento no modelo físico nas secções 5 e 6

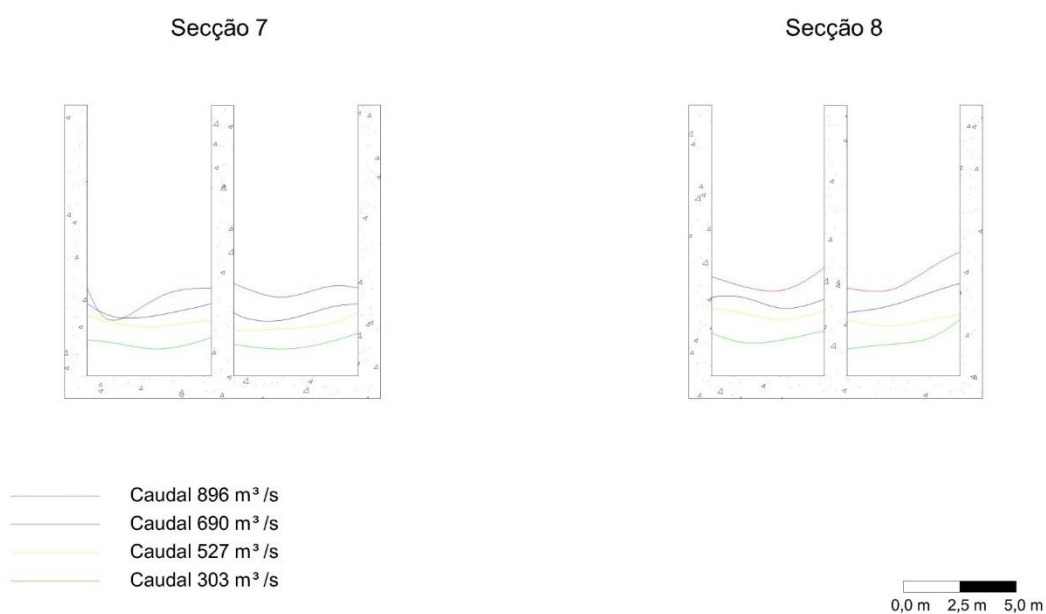


Figura 13 – Alturas de escoamento no modelo físico nas secções 7 e 8

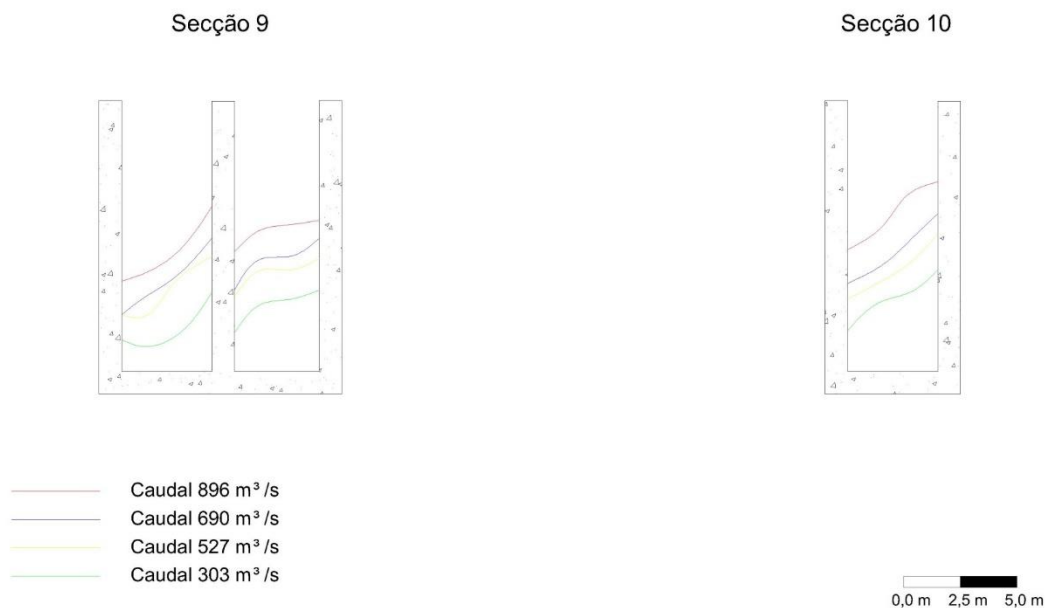


Figura 14 – Alturas de escoamento no modelo físico nas secções 9 e 10

4.2.2 PRESSÕES

4.2.2.1 Medições

Nos ensaios realizados (incluindo o que foi conduzido com o caudal de projeto, $Q=2062 \text{ m}^3/\text{s}$) foram, sempre que possível, efetuadas as medições das alturas piezométricas em todas as tomadas de pressão existentes no modelo físico reduzido. A localização das tomadas de pressão é representada na Figura 9, sendo visíveis as 16 tomadas de pressão do fundo do descarregador e as 20 tomadas de pressão lateral, correspondentes às tomadas 1 E/D a 10 E/D para as tomadas instaladas no muro esquerdo (E) e direito (D).

De facto, em alguns ensaios, correspondentes aos caudais mais reduzidos, ocorreram situações em que a altura da lâmina de água não atingia a cota de algumas tomadas de pressão junto às paredes do descarregador, cota essa que é observável em perfil e que em planta está localizada na parede do DCC. Para avaliação da pressão hidrostática, após realizada a leitura dos níveis atingidos nos piezómetros, foi efetuada uma correção dos valores observados com uma redução da pressão efetiva devido às condições de capilaridade existentes nos tubos piezométricos.

Os valores obtidos na campanha de ensaios são concordantes com os valores medidos em ensaios anteriores realizados no LNEC durante a realização do estudo em modelo.

4.2.2.2 Pressões para o caudal de projeto de $2062 \text{ m}^3/\text{s}$

Foram quantificadas as pressões médias para o caudal de projeto. Esses valores são apresentados na Tabela 2. Para viabilizar as medições de alturas de escoamento no interior do túnel, foi necessário retirar a parte superior do descarregador (corporizado, no modelo, por uma cobertura materializada por tubagem em acrílico) com o objetivo de ser possível aceder ao (e melhor

visualizar o) escoamento nessa zona. O caudal máximo ensaiado para esse efeito foi, assim, de $896 \text{ m}^3/\text{s}$.

Em todos os ensaios foi mantido o nível de água na zona de aproximação no valor correspondente ao NPA da albufeira, à cota (152,5).

Os caudais dos ensaios realizados no modelo, as respetivas aberturas das comportas e os caudais correspondentes no protótipo são patentes na Tabela 1. Dos cinco caudais indicados, e de acordo com o antes referido, apenas quatro foram utilizados para medição das alturas de escoamento: $Q = 896 \text{ m}^3/\text{s}$, $690 \text{ m}^3/\text{s}$, $527 \text{ m}^3/\text{s}$ e $303 \text{ m}^3/\text{s}$. Na Tabela 2 estão incluídas as cotas das tomadas de pressão.

Tabela 2 – Pressões para o caudal de $2062 \text{ m}^3/\text{s}$ no modelo físico

Tomada nº	Cota Tomada (m)	p/y (m)	Tomada nº	Cota Tomada (m)	p/y (m)
1	138,10	0,72	2E	99,91	6,48
2	138,50	0,06	2D	99,91	8,47
3	138,14	-1,13	3E	96,06	16,41
4	135,63	0,21	3D	96,06	18,83
5	131,92	5,52	4E	99,53	9,22
6	128,07	6,16	4D	99,53	11,08
7	120,42	11,64	5E	96,77	14,71
8	115,01	10,54	5D	96,77	19,11
9	111,43	8,29	6E	100,24	5,72
10	108,70	5,07	6D	100,24	11,92
11	105,81	4,80	7E	103,28	2,12
12	96,84	8,38	7D	103,28	6,84
13	95,05	15,56	8E	98,25	13,72
14	94,57	19,51	8D	99,00	7,89
15	95,28	18,55	9E	101,72	5,73
16	96,76	16,51	9D	102,47	5,29
1E	96,44	12,87	10E	104,76	1,20
1D	96,44	14,79	10D	105,97	3,40

Nos resultados obtidos para o caudal de projeto observou-se a existência de uma pressão negativa na tomada de pressão 3 localizada na zona descendente da soleira do descarregador. A pressão máxima ocorre na zona terminal do descarregador, nomeadamente na tomada 5D.

4.2.2.3 Pressões para o caudal de $896 \text{ m}^3/\text{s}$

As pressões médias obtidas para o caudal de $896 \text{ m}^3/\text{s}$ são as apresentadas na Tabela 3.

Em comparação com o ensaio conduzido para o caudal de projeto ($Q=2062 \text{ m}^3/\text{s}$) mantém-se a altura piezométrica negativa na zona da soleira do descarregador, tomada 4. De um modo geral, as alturas piezométricas obtidas neste ensaio são inferiores às obtidas para o caudal de projeto, o que, dada a redução do caudal, era já expectável. De notar ainda os valores elevados das pressões nas tomadas 1 e 2 contrariamente aos valores obtidos para o caudal de projeto. Estes valores devem-se ao facto de as comportas se encontrarem com uma abertura parcial para o caudal em estudo, sendo que o escoamento se dá em orifício.

Tabela 3 – Pressões para o caudal de 896 m³/s no modelo físico

Tomada nº	Cota Tomada (m)	p/y (m)	Tomada nº	Cota Tomada (m)	p/y (m)
1	138,10	10,14	2E	99,91	-
2	138,50	7,01	2D	99,91	-
3	138,14	1,35	3E	96,06	5,56
4	135,63	-0,78	3D	96,06	8,17
5	131,92	3,04	4E	99,53	-
6	128,07	2,37	4D	99,53	-0,45
7	120,42	5,07	5E	96,77	4,91
8	115,01	2,17	5D	96,77	11,61
9	111,43	3,21	6E	100,24	-0,29
10	108,70	0,98	6D	100,24	1,88
11	105,81	0,65	7E	103,28	-
12	96,84	4,22	7D	103,28	-
13	95,05	6,57	8E	98,25	12,48
14	94,57	9,22	8D	99,00	3,61
15	95,28	9,38	9E	101,72	-
16	96,76	9,20	9D	102,47	0,20
1E	96,44	3,82	10E	104,76	-
1D	96,44	5,12	10D	105,97	-

«-» - Escoamento não atinge cota da tomada de pressão

4.2.2.4 Pressões para o caudal de 690 m³/s

No ensaio com o caudal de 690 m³/s foram registadas as pressões presentes na Tabela 4.

Tabela 4 – Pressões para o caudal de 690 m³/s no modelo físico

Tomada nº	Cota Tomada (m)	p/y (m)	Tomada nº	Cota Tomada (m)	p/y (m)
1	138,10	11,63	2E	99,91	-
2	138,50	8,68	2D	99,91	-
3	138,14	1,85	3E	96,06	3,58
4	135,63	-0,97	3D	96,06	5,94
5	131,92	2,49	4E	99,53	-
6	128,07	2,81	4D	99,53	0,17
7	120,42	3,89	5E	96,77	2,99
8	115,01	2,66	5D	96,77	9,69
9	111,43	3,40	6E	100,24	0,08
10	108,70	0,42	6D	100,24	0,64
11	105,81	0,27	7E	103,28	-
12	96,84	3,48	7D	103,28	-
13	95,05	5,14	8E	98,25	4,49
14	94,57	7,05	8D	99,00	2,56
15	95,28	7,46	9E	101,72	-
16	96,76	7,40	9D	102,47	0,02
1E	96,44	2,70	10E	104,76	-
1D	96,44	4,44	10D	105,97	-

«-» - Escoamento não atinge cota da tomada de pressão

Comparando os valores da Tabela 4 com os valores obtidos para o caudal de 896 m³/s, valores presentes na Tabela 3, é possível verificar que as alturas piezométricas obtidas são inferiores para

este caudal. De salientar o facto de as pressões negativas que existiam na zona final do descarregador para o caudal de 896 m³/s não se verificarem para o caudal de 690 m³/s. Assim sendo, a única pressão negativa observada ocorre, tal como para os outros caudais, na crista da soleira do descarregador.

4.2.2.5 Pressões para o caudal de 527 m³/s

As pressões referentes ao ensaio realizado para o caudal de 527 m³/s são apresentadas na Tabela 5.

Os valores obtidos são de um modo geral idênticos aos obtidos para os caudais mais elevados, de 896 e 690 m³/s. No entanto há a referir que nos ensaios com este caudal e com o caudal inferior (303 m³/s, apresentados de seguida, na Tabela 6) passam a existir pressões negativas no canal do descarregador, tomadas 10 e 11, com valores dentro do normal, segundo descrito em Muralha *et al.* (2014).

Tabela 5 – Pressões para o caudal de 527 m³/s no modelo físico

Tomada n ^o	Cota Tomada (m)	p/y (m)	Tomada n ^o	Cota Tomada (m)	p/y (m)
1	138,10	12,68	2E	99,91	-
2	138,50	10,29	2D	99,91	-
3	138,14	2,53	3E	96,06	2,22
4	135,63	-0,97	3D	96,06	4,32
5	131,92	1,99	4E	99,53	-
6	128,07	1,51	4D	99,53	-
7	120,42	2,96	5E	96,77	1,63
8	115,01	1,73	5D	96,77	7,64
9	111,43	2,96	6E	100,24	-
10	108,70	-0,26	6D	100,24	-
11	105,81	-0,10	7E	103,28	-
12	96,84	3,73	7D	103,28	-
13	95,05	4,83	8E	98,25	2,50
14	94,57	5,44	8D	99,00	1,57
15	95,28	6,03	9E	101,72	-
16	96,76	5,91	9D	102,47	-
1E	96,44	1,77	10E	104,76	-
1D	96,44	3,63	10D	105,97	-

«-» - Escoamento não atinge cota da tomada de pressão

4.3.2.6 Pressões para o caudal de 303 m³/s

Na Tabela 6 são apresentadas as pressões durante a realização dos ensaios para o caudal de 303 m³/s.

Neste ensaio, é possível observar alturas piezométricas mais reduzidas quando comparadas com as presentes nas restantes séries de ensaios e com variações ao longo do canal análogas às medidas no ensaio com um caudal de 527 m³/s. De salientar também o alcance apenas de cinco das tomadas de pressão laterais o que é indicativo das baixas alturas de escoamento.

Tabela 6 – Pressões para o caudal de 303 m³/s no modelo físico

Tomada nº	Cota Tomada (m)	p/y (m)	Tomada nº	Cota Tomada (m)	p/y (m)
1	138,10	14,11	2E	99,91	-
2	138,50	12,90	2D	99,91	-
3	138,14	5,32	3E	96,06	1,29
4	135,63	-0,47	3D	96,06	1,91
5	131,92	1,18	4E	99,53	-
6	128,07	0,95	4D	99,53	-
7	120,42	1,47	5E	96,77	-
8	115,01	0,43	5D	96,77	4,29
9	111,43	2,22	6E	100,24	-
10	108,70	-1,00	6D	100,24	-
11	105,81	-0,96	7E	103,28	-
12	96,84	2,30	7D	103,28	-
13	95,05	2,79	8E	98,25	-
14	94,57	3,08	8D	99,00	0,02
15	95,28	3,74	9E	101,72	-
16	96,76	3,49	9D	102,47	-
1E	96,44	-	10E	104,76	-
1D	96,44	1,65	10D	105,97	-

«-» - Escoamento não atinge cota da tomada de pressão

4.2.3 ALCANCE DO JATO

Como descrito no Capítulo 2 e no Anexo C da presente dissertação, a estrutura terminal do descarregador de cheias é constituída por um trampolim. Interessa avaliar o alcance dos jatos descarregados dado que este constitui um parâmetro que pode contribuir para a caracterização da zona de erosões no leito e margens, na zona de restituição. No presente trabalho foi medido o alcance máximo de cada um dos jatos lançados pelos dois vãos da estrutura terminal, para os diferentes caudais estudados. Esses valores encontram-se discriminados na Tabela 7. Adotaram-se as designações de jato esquerdo e jato direito para os jatos resultantes do vão esquerdo e vão direito do descarregador.

No sentido de obter uma correta determinação do alcance do jato é necessário reproduzir no modelo a vazão do rio a jusante do descarregador para os diferentes caudais em estudo, segundo procedimento descrito em Couto *et al.*, 2013.

O alcance máximo do jato é dependente da energia com que o escoamento chega à estrutura terminal, da geometria da secção terminal, do nível do rio a jusante e da secção onde o jato atinge o rio. Como descrito no Anexo B.1 do presente documento, a cota de jusante foi definida com base na curva de vazão do rio, que resulta de dados anteriores fornecidos pela EDP. Nos ensaios realizados apenas o descarregador de cheias complementar estava em funcionamento, não entrando em funcionamento o descarregador existente no corpo da barragem. Esta opção representa a situação mais gravosa em termos de alcance do jato e erosões do leito e margens do rio, uma vez que o colchão de água na zona de impacto no leito é menor.

Os valores apresentados para o alcance máximo do jato resultam de medições cujo eixo de medição corresponde ao alinhamento do septo central do descarregador na sua parte final. A definição do alcance do jato/limite de impacto foi efetuado através de observações do alcance médio máximo, dado que existe uma pequena variação ao longo do tempo. Trata-se de um procedimento que poderá ter imprecisões associadas a erros de paralaxe, entre outros relacionados com a correta definição do eixo de medição e fenómenos de turbulência.

Tabela 7 – Alcance do jato para os diferentes caudais no modelo físico

Caudal (m ³ /s)	Cota jusante	Alcance máximo (m)	
		Jato esquerdo	Jato direito
2062	86,73	80,6	70,1
896	83,25	74,4	64,8
690	82,42	70,1	60,1
527	81,67	68,2	58,3
303	80,38	59,5	47,1

Os alcances maiores foram, como era expectável, obtidos para os caudais superiores. Verifica-se que o jato proveniente do vão esquerdo apresenta nos diversos ensaios um alcance superior ao jato proveniente do vão direito. Esta diferença de alcance entre os dois jatos constitui um dos efeitos pretendidos na fase de projeto que visa, através da configuração da fase terminal do descarregador, minimizar a erosão, criando dois pontos de impacto no jato no leito do rio distintos e assim causar a respetiva dispersão no caudal descarregado que minimiza o desenvolvimento de erosões no leito.

4.2.4 VELOCIDADES

Nos dois ensaios correspondentes aos caudais mais elevados – o caudal de projeto $Q = 2062 \text{ m}^3/\text{s}$ e o caudal de $896 \text{ m}^3/\text{s}$ –, foram também efetuadas medições de velocidades. A localização das secções em que se realizaram essas medições é representada na Figura 9. A disposição das secções de medição difere entre os dois vãos. Para o vão esquerdo foram efetuadas medições na secção do início da soleira, secção v1, na secção da crista da soleira, secção v2, na secção v4, na parte final do descarregador e na secção de saída do descarregador, secção v6. Para o vão direito, foram realizadas medições na secção de início, secção v1, e crista da soleira, secção v2, bem como na secção v3, na parte final do descarregador de cheias e na secção de saída do descarregador, secção v5.

As medições de velocidades foram obtidas com recurso a um molinete, a meia altura da lâmina de escoamento. A descrição do equipamento está disponível no Anexo B.3 do presente documento. Nesse anexo inclui-se ainda a descrição do processo de obtenção da cota de medição da velocidade. As velocidades obtidas para o caudal de projeto nas secções acima referidas são as apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Velocidades no modelo físico para o caudal $Q = 2062 \text{ m}^3/\text{s}$

		n.º do tipo de hélice	Altura de medição (m)	Rotação da hélice (r.p.m.)	Velocidade (m/s)
Vão direito	Secção v1 (início da soleira)	4	8,56	165	11,0
	Secção v3	4	1,86	406	27,0
	Secção v5 (Saída do descarregador)	4	3,03	582	38,8
Vão esquerdo	Secção v1 (início da soleira)	4	8,56	149	9,9
	Secção v4	4	1,86	-	-
	Secção v6 (Saída do descarregador)	4	3,03	336	22,4

«-» - Não foi possível efetuar medição

Dado que durante a realização dos ensaios não foi possível obter a estabilidade do molinete, não foi possível obter a medição de velocidades para a secção de estudo v4, no vão esquerdo do DCC.

No ensaio realizado para o caudal de $Q = 896 \text{ m}^3/\text{s}$ já foi possível obter valores de velocidades para a totalidade das secções em estudo, sendo que os valores obtidos nos referidos ensaios são apresentados na Tabela 9.

Dos resultados das medições obtidas denotam-se a existência de valores de velocidades superiores no vão direito quando comparados aos do vão esquerdo, com os procedimentos e equipamento descritos.

Muralha *et al.* (2014) ressaltam ainda a possibilidade da existência de imprecisões nas medições de velocidades associadas à dificuldade de estabilização da hélice do molinete e possível deficiente orientação da mesma com o escoamento.

Tabela 9 – Velocidades em modelo físico para o caudal $Q = 896 \text{ m}^3/\text{s}$

		n.º do tipo de hélice	Altura de medição (m)	Rotação da hélice (r.p.m.)	Velocidade (m/s)
Vão direito	Secção v1 (início da soleira)	5	7,94	459	3,7
	Secção v2 (crista da soleira)	5	2,33	1839	13,5
	Secção v3	5	1,24	3728	26,9
	Secção v5 (Saída do descarregador)	4	2,41	607	40,4
Vão esquerdo	Secção v1 (início da soleira)	5	7,94	430	3,5
	Secção v2 (crista da soleira)	5	2,33	1614	11,9
	Secção v4	5	1,24	3732	26,9
	Secção v6 (Saída do descarregador)	4	2,41	393	26,2

Tendo em conta o fator de imprecisão que é ressaltado em Muralha *et al.* (2014) associado a possíveis imprecisões na medição das velocidades no modelo físico, descritas anteriormente, o parâmetro não foi tido como um bom parâmetro para posterior calibração do modelo computacional, dado que os resultados no modelo físico não se tomam por tão robustos quando comparados por exemplo com os resultados de pressão ou de alturas de escoamento

5

Ensaaios preliminares e de calibração

O capítulo 5 está dividido em 4 subcapítulos. O primeiro é respeitante a simulação numérica com uma configuração de soleira normal de um descarregador de cheias e paramento vertical e posterior comparação com ábacos da USACE. O segundo é respeitante a uma configuração com soleira normal de um descarregador de cheias de paramento inclinado com posterior comparação com os resultados do caso de estudo. O terceiro subcapítulo contém variantes à simulação do ponto 5.2 para efeito de testes sensibilidade e calibração final. No ponto 5.4, é apresentada uma simulação base da secção inicial, em 3D, e duas variantes a essa simulação para efeito de calibração do modelo computacional final.

A calibração de um modelo é uma fase importante e preponderante na construção de uma simulação numérica. Serve a calibração para que se adequem diferentes modos numéricos a considerar no modelo computacional. Estas funções e métodos de análise numérica, que são descritos no capítulo 3, podem ser articulados de diferentes formas constituindo diferentes modelos computacionais que consideram determinadas grandezas físicas e/ou que utilizam modos numéricos diferentes, tais como diferentes modelos de turbulência. Os ensaios de calibração são, portanto, uma fase crítica da construção de um modelo computacional de simulação numérica.

5.1 SOLEIRA NORMAL COM PARAMENTO VERTICAL

O primeiro teste de sensibilidade foi efetuado para uma configuração de soleira normal e paramento vertical de um descarregador de cheias. Este primeiro teste destina-se a avaliar a adequação do *software* (Flow 3D) utilizado e perceber a existência de alguns fenómenos pontuais.

A opção pela configuração de soleira normal com paramento vertical tem fundamento na existência de uma soleira WES no caso de estudo da presente dissertação. No entanto, e embora essa soleira normal seja de paramento inclinado, das pesquisas bibliográficas efetuadas apenas foi possível obter ábacos com diagramas de pressão, pelo que se toma a referida configuração geométrica na presente simulação.

A simulação de uma configuração com a possibilidade de comparação a um ábaco empírico permite a comparação de valores de pressão num maior número de pontos, o que constitui uma vantagem numa primeira análise, permitindo, desde logo, detetar quais as zonas de simulação mais críticas.

5.1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS DA SIMULAÇÃO DE UMA SOLEIRA WES COM PARAMENTO VERTICAL

No dimensionamento de um descarregador é frequente recorrer-se a métodos empíricos tais como as diretrizes enunciadas pelo Corpo de Engenheiros do Exército Norte-americano (*American Army Corps of Engineers* - USACE). Este órgão desenvolveu uma série de recomendações específicas para projeto, HDC (*Hydraulic Design Criteria*), que fornecem indicações para o dimensionamento de soleiras normais, do tipo WES, para diferentes grandezas, como pressões, altura de água a jusante do descarregador, etc., para diferentes opções de dimensionamento (USACE, 1970).

No presente trabalho foi efetuada uma comparação do ábaco do USACE respeitante à distribuição das pressões ao longo de soleira descarregadora do tipo WES com valores da simulação numérica. A configuração geométrica, construída com base nos critérios de dimensionamento HDC, tem uma altura de dimensionamento (*design head*) – H_d – de 12,5 m. O sistema de eixos adotado tem origem na crista da soleira descarregadora, sendo a configuração da soleira usada nos testes apresentada na Figura 15.

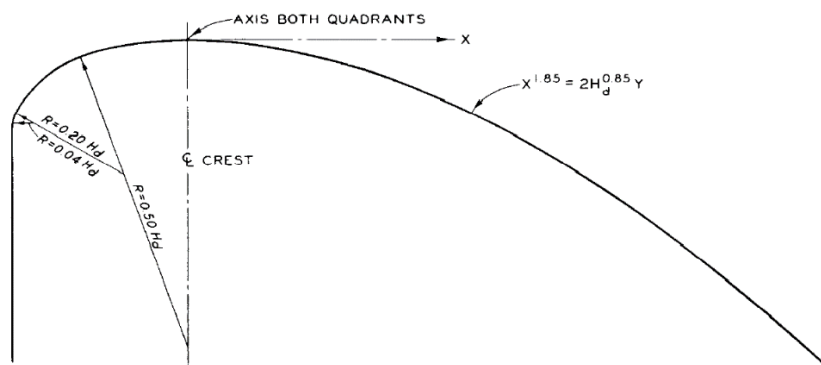


Figura 15 – Critérios de projeto da soleira WES de paramento vertical (USACE, 1970)

O ábaco apresentado na Figura 16 (USACE, 1970) e relativo à distribuição das pressões no descarregador, apresenta a variação da pressão na face ao longo da soleira descarregadora para diferentes relações entre o nível de água a montante e a carga de dimensionamento da estrutura (H_d - *design head*).

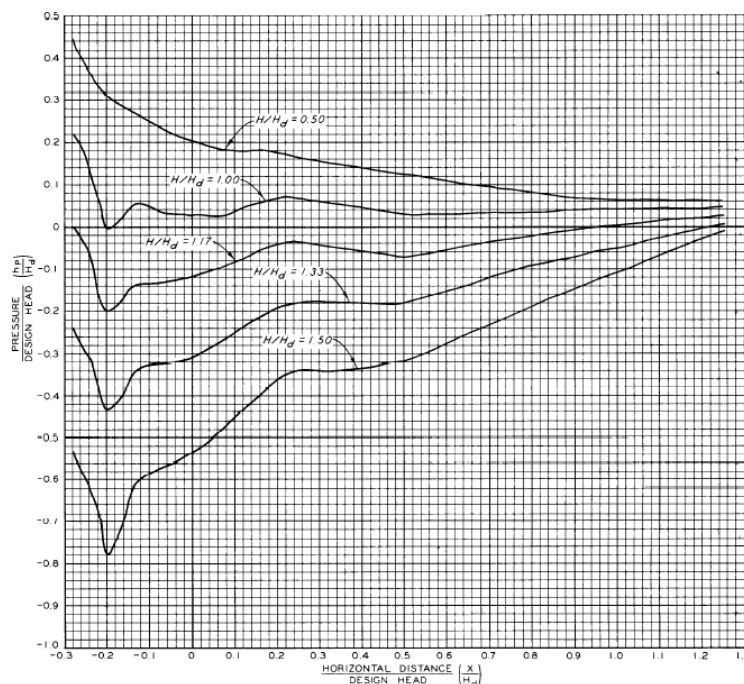


Figura 16 – Valores de pressão na soleira WES de paramento vertical (USACE, 1970)

A configuração geométrica construída para a simulação é apresentada na Figura 17.

O domínio do modelo computacional desenvolve-se de acordo com o referencial colocado na crista do descarregador – posição (0,0) – entre as abcissas -30 e +35 (eixo XX) e as ordenadas -20 a +15 (eixo YY). A configuração geométrica apresenta um comprimento total de 65 m e uma altura total de 35 m.

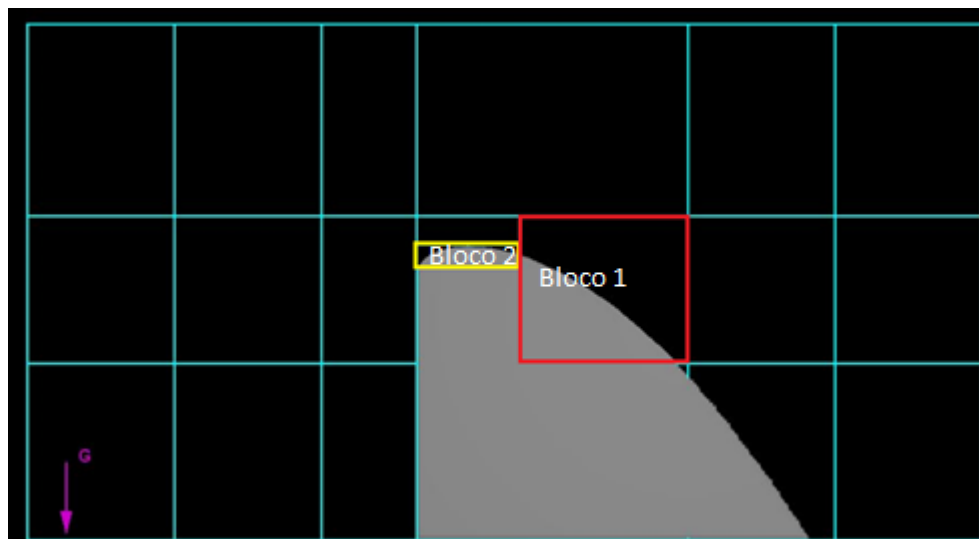


Figura 17 – Configuração usada na simulação numérica para soleira WES de paramento vertical (plano XZ)

5.1.2 MALHA DE CÁLCULO

A malha de cálculo utilizada varia ao longo do modelo computacional. A não uniformidade da malha de cálculo tem por objetivo subdividir o domínio para que se obtenha um grau de precisão adequado a cada parte desse domínio, variando o grau de precisão de acordo com a importância da zona em estudo.

Tendo presente as considerações anteriormente referidas, as características genéricas da malha utilizada na presente simulação computacional são as apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Soleira WES de paramento vertical: Características genéricas da malha computacional

								Total
Coordenada direção x	-30	-20	-10	-3.5227	15	25	35	65
Número de células		29	34	26	93	40	34	256
Espaçamento da malha		-0.34	-0.29	-0.25	-0.20	-0.25	-0.29	

					Total
Coordenada direção Y	-20	-8	2	15	35
Número de células		48	50	52	150
Espaçamento da malha		-0.25	-0.20	-0.25	

Para além da malha genérica anteriormente referida foram ainda considerados dois blocos de malha auxiliares, visíveis na Figura 17. Estes blocos – Bloco 1 e 2, a vermelho e amarelo, respetivamente –, têm como objetivo o refinamento da malha na região em causa. As características das correspondentes malhas são resumidas na Tabela 11 (Bloco 1) e na Tabela 12 (Bloco 2).

Tabela 11 – Soleira WES de paramento vertical: Características da malha do Bloco 2

			Total
Coordenada direção X	-3.5227	3.5	7.0227
Número de células		175	175
Espaçamento da malha		0.040	

			Total
Coordenada direção Y	-1.7	0.1	1.8
Número de células		45	45
Espaçamento da malha		0.040	

Tabela 12 – Soleira WES de paramento vertical: Características da malha do Bloco 3

			Total
Coordenada direção X	3.5227	15	11.4773
Número de células		153	153
Espaçamento da malha		0.075	

			Total
Coordenada direção Y	-8	2	10
Número de células		133	133
Espaçamento da malha		0.075	

O uso dos blocos auxiliares tornou-se imperativo dado que o *software* Flow 3D utiliza o método FAVOR™. Este método, tal descrito no ponto 3.3.2.2 da presente dissertação, aproxima o elemento geométrico importado no *software* através de uma interpolação, sendo a precisão da interpolação condicionada portanto pela dimensão da malha. Na Figura 18 é visível o erro associado à representação da superfície do descarregador através do método FAVOR™.



Figura 18 – Pormenor da representação da soleira WES pelo método FAVOR™

É notória a diferença no grau de representação da curva, numa espécie de “pixelização”, entre a parte da curva inserida no bloco 2 (a vermelho na Figura 18) com 0,04m de comprimento de face de célula e a parte inserida no bloco 3 (a amarelo da Figura 18) com 0,075m de comprimento de face de célula.

5.1.3 CONDIÇÕES DE FRONTEIRA

As condições de fronteira utilizadas para o bloco de malha principal foram as seguintes:

- Plano X mínimo (secção de entrada): Pressão específica (*Specific Pressure - P*)
- Plano X máximo (secção de saída): Escoamento (*Outflow - O*)
- Plano Y mínimo: Simetria (*Symetric - S*)
- Plano Y máximo: Simetria (*Symetric - S*)
- Plano Z mínimo: Parede (*Wall - W*)
- Plano Z máximo: Simetria (*Symetric - S*)

A condição de fronteira imposta na secção de Xmin (Pressão Específica) assegura que o nível de água na entrada do modelo seja constante, em semelhança ao que sucede numa albufeira.

De referir que as condições de fronteira para os blocos 2 e 3 foram de simetria em todas as fronteiras dos referidos blocos. Esta condição permite uma concordância do escoamento nas fronteiras dos blocos.

5.1.4 CONDIÇÕES DE ENSAIO

A relação H/H_d , sendo H a altura de montante, considerada para comparação entre os valores do ábaco do USACE foi de 1,17. Esta opção teve em consideração a necessidade de se evitarem valores muito próximos de zero, possíveis para uma relação igual a 1. Como tal, e dada esta consideração, a altura a montante (H) seria de 14,625m. Acresce a esta justificação o facto de a referida relação H/H_d ser a mais próxima do caso de estudo, correspondente ao descarregador de cheias complementar de Caniçada ($H/H_d=1,13$). A fronteira de entrada tem associada uma pressão específica que permite controlar o nível na albufeira a montante no modelo computacional.

A pressão específica de entrada não foi, no entanto, a altura de 14,625. De facto, e com o objetivo de reduzir a dimensão do modelo computacional, foi calculado o valor da cota da albufeira na zona de aproximação à entrada do descarregador de acordo com o especificado pelo USDI (1961) na obra “*Design of a small Dams*”, embora a barragem de Caniçada não seja uma pequena barragem. A diminuição do nível de água na zona de aproximação é influenciada por diversos efeitos, tais como a profundidade da zona de aproximação, a relação entre a altura de dimensionamento e a altura efetiva ou a configuração da albufeira (USDI, 1999).

No Anexo C é apresentado o cálculo para a obtenção da altura final a considerar na entrada do modelo geométrico considerado na modelação numérica de acordo com o formulado pelo USDI. Essa altura de cálculo passará a constituir a pressão específica na fronteira de entrada da simulação numérica. A pressão específica de entrada, obtida pelo cálculo referido, foi de 13,95 m, medida relativamente à cota da crista da soleira descarregadora (ponto geométrico máximo segundo Z). A crista da soleira corresponde à origem do sistema de eixos.

Para garantir uma estabilidade na zona de aproximação à soleira descarregadora do modelo computacional e, consequentemente, no escoamento, foi considerada a variação gradual do nível de água à entrada. Essa variação é linear, crescente e estabiliza 35s após o início da simulação. Pode ser observada a representação gráfica das condições de entrada impostas na Figura 19.

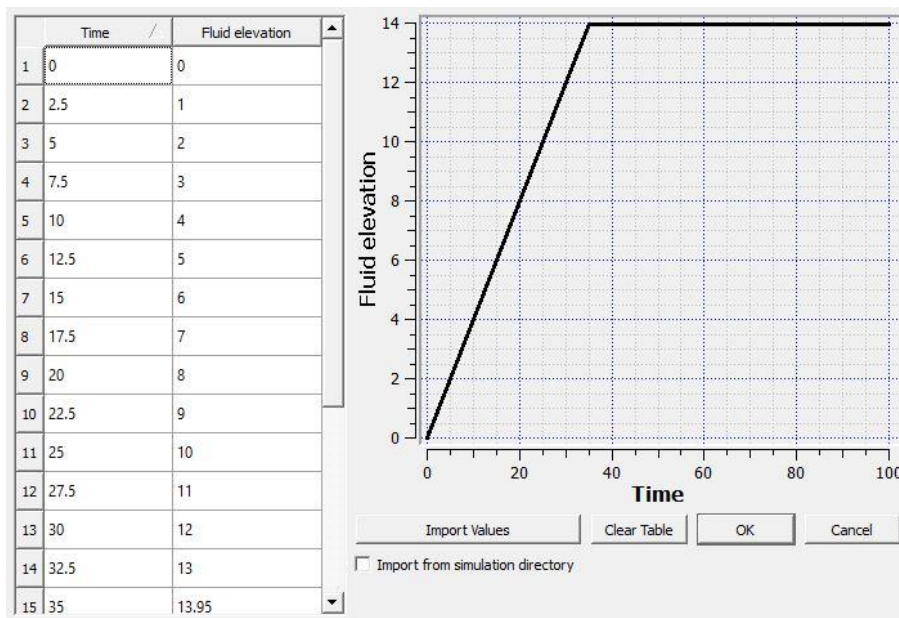


Figura 19 – Soleira WES de paramento vertical: Variação das condições de fronteira em X min

No cálculo efetuado foi utilizado um tempo de simulação de 60s e considerado um fluido incompressível (água), superfície livre e as unidades no sistema internacional. Em termos físicos, foi considerada uma

aceleração gravítica de $9,8065 \text{ m/s}^2$, no sentido negativo do eixo Z, o modelo de viscosidade RNG, com o comprimento máximo de mistura de turbulência dinâmico e calculado automaticamente, e uma tensão superficial de 73 N/m . Foi considerado emulsão de ar – *Air Entrainment* – com um coeficiente de mistura de 0,5, uma tensão superficial de 73 N/m . O fluido utilizado foi, como referido anteriormente, a água com uma massa volúmica de 1000 kg/m^3 , uma viscosidade cinemática constante de $0,001 \text{ m}^2/\text{s}$ e uma compressibilidade de $4.55 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$.

Em termos numéricos, foi utilizado um intervalo mínimo de iteração de $1 \times 10^{-8} \text{ s}$. Em termos de cálculo de pressão foi utilizado o modelo implícito, GMRES. Foi efetuado o cálculo de movimento e transporte de massa por equações de 2ª ordem.

5.1.5 RESULTADOS

A evolução do nível de água no descarregador para diferentes tempos de cálculo (6, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 54 e 60 segundos) é visível na Figura 20. A escala de cores visível na respetiva figura corresponde à variação da pressão (gama de vermelho: menor pressão e gama de azul: maior pressão).

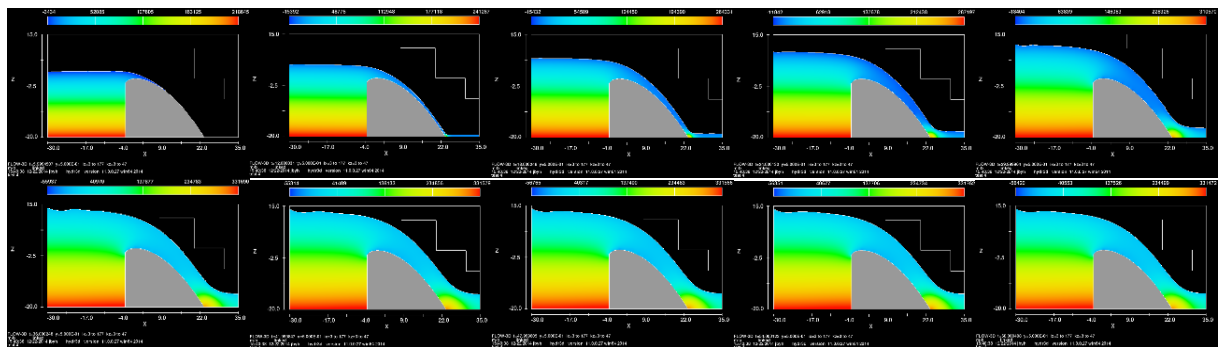


Figura 20 – Soleira WES de paramento vertical: Evolução da altura de água ao longo do tempo

A Figura 21 demonstra o tempo necessário para estabilização do caudal descarregado no modelo computacional.

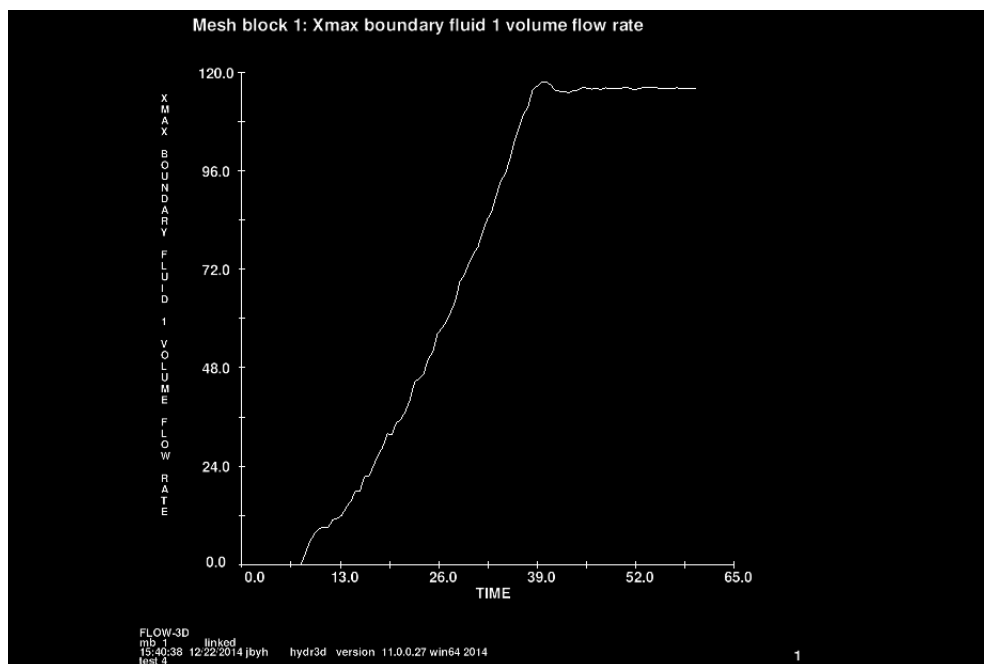


Figura 21 – Soleira WES de paramento vertical: Evolução temporal do caudal descarregado

É notória a influência da evolução das condições de enchimento descritas (Figura 20) na evolução do valor do caudal descarregado no modelo computacional. É também possível observar a estabilidade do valor do caudal descarregado após ter sido atingido o valor máximo (Figura 21). O gráfico reflete o caudal escoado pela fronteira correspondente ao valor de X máximo.

Após a simulação, foram comparados os resultados de pressão obtidos pela modelação numérica com os valores obtidos através do ábaco da Figura 16. A extração dos valores de pressão, a cada 0,5 m, obtidos ao longo da superfície da soleira descarregadora foi efetuada com recurso à funcionalidade *Neutral File* do *software* Flow 3D. Os pontos e modo de extração são detalhados no Anexo C.

Os valores de pressão obtidos foram extraídos separadamente para cada um dos três blocos de malha. Dada a diferente dimensão de malha de cálculo, poderão existir diferenças nos resultados de pressão. Na opção *Neutral file*, podem ser obtidos resultados de duas formas distintas: *Interpolate Data* ou *Cell Center Data*. A opção *Interpolate Data* fornece um valor interpolado dos valores centrais das células próximas à coordenada do ponto introduzido. A opção *Cell Center Data* fornece o valor presente na célula mais próxima à coordenada considerada. Na presente comparação foi utilizada a opção *Interpolate Data*, dado que a escolha da opção *Center Data* poderia ter como consequência a recolha de muitos dados de células respeitantes à estrutura do descarregador e não à zona de fluido.

Na Tabela 13 são apresentados os valores de pressão nos 3 diferentes blocos de malha.

Tabela 13 – Soleira WES de paramento vertical: Valores da pressão para os 3 blocos de malha

Bloco 1		Bloco 2		Bloco 3	
X/Hd	P (hp/Hd)	X/Hd	P (hp/Hd)	X/Hd	P (hp/Hd)
-2,80E-01	-0,046	3,20E-01	-0,067	-2,80E-01	-0,636
-1,60E-01	-0,127	3,60E-01	-0,107	-2,40E-01	-0,076
-1,20E-01	-0,151	4,00E-01	-0,040	-2,00E-01	-0,157
-8,00E-02	-0,190	4,40E-01	-0,043	-1,60E-01	-0,124
-4,00E-02	-0,247	4,80E-01	-0,104	-1,20E-01	-0,253
0,00E+00	-0,355	5,20E-01	-0,113	-8,00E-02	-0,135
4,00E-02	-0,081	5,60E-01	-0,039	-4,00E-02	-0,316
8,00E-02	-0,073	6,00E-01	-0,095	0,00E+00	-0,526
1,20E-01	-0,034	6,40E-01	-0,117	4,00E-02	-0,015
1,60E-01	-0,096	6,80E-01	-0,068	8,00E-02	-0,071
2,00E-01	-0,076	7,20E-01	-0,001	1,20E-01	-0,032
3,20E-01	-0,100	7,60E-01	-0,041	1,60E-01	-0,090
1,12E+00	0,080	8,00E-01	-0,139	2,00E-01	-0,063
1,16E+00	0,100	8,40E-01	-0,009	2,40E-01	-0,154
1,20E+00	0,099	8,80E-01	0,002	2,78E-01	-0,174
		9,20E-01	-0,040		
		9,60E-01	0,023		
		1,00E+00	0,034		
		1,04E+00	0,010		
		1,08E+00	0,035		
		1,12E+00	0,080		

Da comparação efetuada, entre o resultado do modelo computacional e o ábaco do HDC (USACE, 1970), resultou o gráfico representado na Figura 22, existindo uma diferenciação dos resultados obtidos para os três diferentes blocos. Na referida imagem é notória a grande dispersão dos valores apresentados embora sejam, em termos gerais, concordantes com a linha respeitante ao ábaco do USACE.

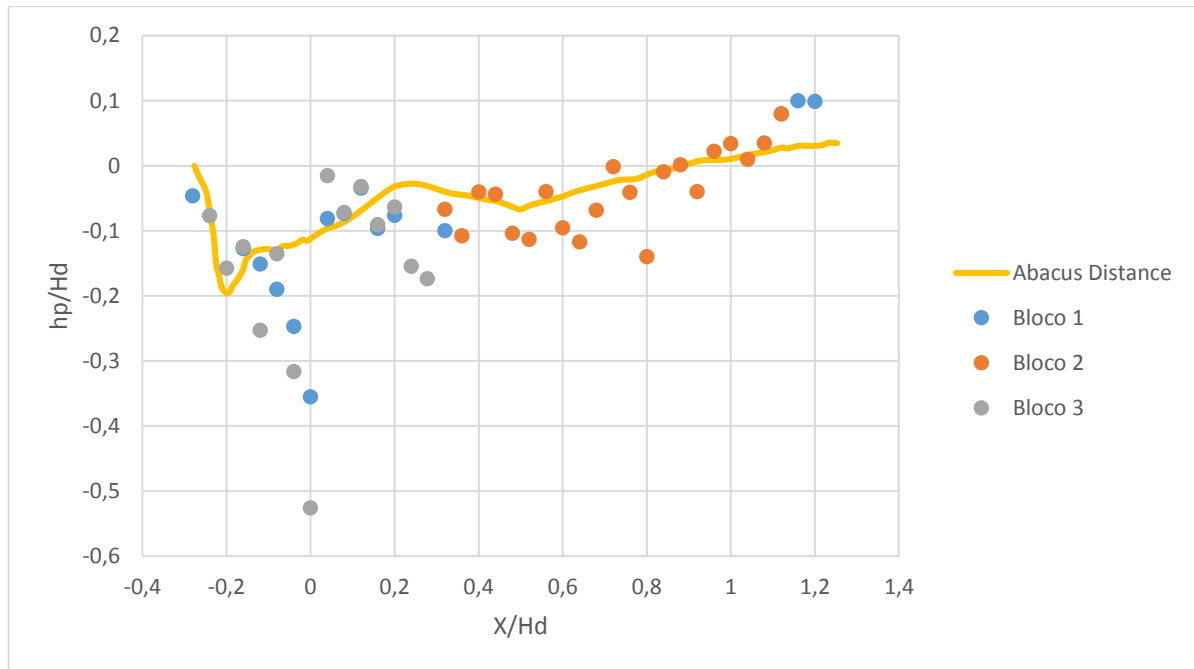


Figura 22 – Soleira WES de paramento vertical: Dispersão dos resultados de pressão

Nos resultados obtidos há a constatar a maior dispersão de valores na zona da crista do descarregador ($X=0$). Esta evidência é sintoma de que a referida zona constitui um ponto de difícil cálculo numérico e consequentemente uma zona de difícil obtenção de resultados numéricos aceitáveis. Não sendo clara nem inequívoca a possível influência do método FAVORTM na dispersão de resultados acima mencionada, tal poderá efetivamente estar na origem e/ou ser uma justificação para a dispersão registada. A constatação da referida discrepância na crista da soleira descarregadora é de elevada importância, dado que no caso de estudo, em modelo reduzido, existe uma tomada de pressão (tomada de pressão 2) que se situa na crista da soleira descarregadora.

5.1.6 TESTE DA INFLUÊNCIA DA MISTURA DE AR NO ESCOAMENTO

Julga-se que a consideração dos fenómenos de emulsão de ar (neste caso, considerando a opção de cálculo de emulsão de ar (*Air Entrainment*) na simulação computacional), poderá não ter uma influência preponderante na precisão dos resultados obtidos no modelo computacional quando aplicado à estrutura de entrada do descarregador, designadamente à soleira. Foi, então realizado um teste numérico tendo por base a simulação anterior (5.1.5) para que se pudesse auferir a sensibilidade do *software* comercial Flow 3D a este parâmetro no caso de estudo atual. Como tal foi considerado um novo ensaio com a mesma configuração geométrica daquela simulação. Foram estabelecidas as mesmas condições iniciais, malha de cálculo e condições de fronteira, diferindo a atual simulação numérica apenas na não consideração de emulsão de ar – *Air entrainment* – no escoamento.

Para as duas diferentes condições de ensaio os níveis de água não apresentaram, em termos gerais, quaisquer diferenças, sendo o aspeto da superfície livre do escoamento obtido neste caso sido similar à apresentada na Figura 20.

Para o modelo computacional sem a consideração do emulsãoamento de ar, o teste numérico conduziu à obtenção das pressões apresentadas na Tabela C3 do ponto C.1 do Anexo C. A Figura 23 permite concluir da dispersão dos resultados obtidos relativamente aos especificados pelo ábaco do USACE.

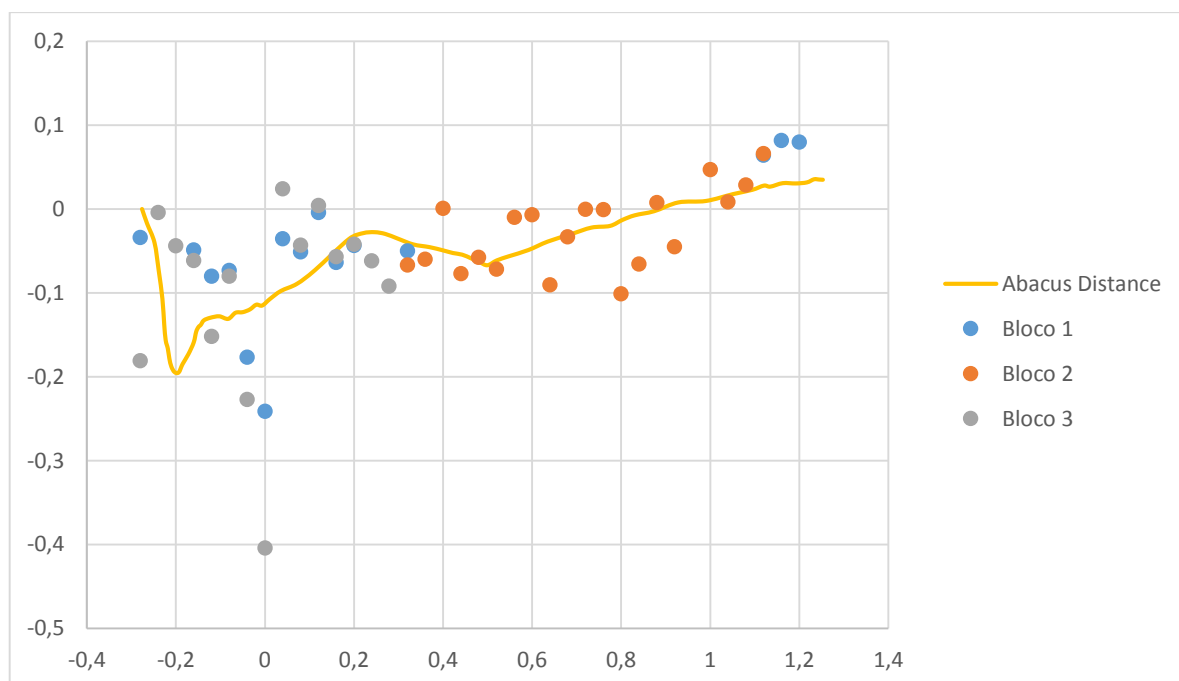


Figura 23 – Soleira WES de paramento vertical sem emulsãoamento de ar: Dispersão dos resultados de pressão

Da comparação entre os gráficos da Figura 22 e da Figura 23, pode-se concluir que não existem diferenças significativas assinaláveis entre a consideração ou não do emulsãoamento de ar. No entanto, é de salientar que na Figura 22, correspondente ao modelo computacional com a consideração do emulsãoamento de ar, existe uma maior estabilidade dos resultados de pressão entre pontos seguidos face ao modelo computacional sem consideração de emulsãoamento de ar (Figura 23). Esta maior estabilidade permite obter resultados mais robustos, que consequentemente se traduzem numa maior confiança nos mesmos. Dado que não existe um incremento substancial do tempo de cálculo, a consideração deste fenómeno, a sua consideração é uma vantagem para o estudo de uma soleira descarregadora, sendo um elemento importante a utilizar na construção da simulação numérica do DCC de Caniçada.

5.2 SOLEIRA NORMAL DE PARAMENTO INCLINADO

5.2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O descarregador de cheias complementar de Caniçada, como referido no capítulo 2, é constituído na secção de entrada (zona inicial) por uma soleira normal do tipo WES. Como anteriormente mencionado, a soleira normal tem um paramento inclinado em 2:3 e a crista da soleira possui um desnível de 7 metros em relação ao patamar de entrada. Para o estudo preliminar e de calibração das pressões na referida soleira normal e posterior comparação com os dados obtidos em modelo físico reduzido foi construído um modelo computacional em duas dimensões. Este modelo, cuja configuração geométrica tem por base o DCC de Caniçada, contempla a soleira normal e uma parte do descarregador a jusante para que as condições do escoamento sejam reproduzidas de uma forma fidedigna. No modelo físico, para a secção considerada, existem quatro tomadas de pressão na zona da soleira WES, correspondentes às quatro

primeiras tomadas de pressão do modelo hidráulico. A posição dessas tomadas de pressão na estrutura de entrada pode ser observada na Figura 24.

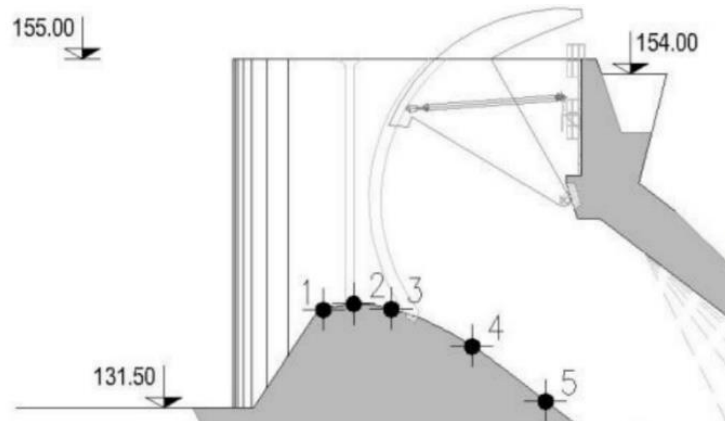


Figura 24 – Localização das tomadas de pressão na soleira normal, estrutura de entrada (Muralha *et al.*, 2014)

A configuração geométrica do modelo computacional para a presente simulação numérica encontra-se representada na Figura 25 e é composta por uma região de aproximação de patamar constante à cota de 131,5 e 33 metros de comprimento, uma segunda zona respeitante à soleira normal, com 16,6 metros de desenvolvimento, seguido por um troço de inclinação constante e igual a 77%, com 12m de desenvolvimento, uma fração em curva de transição, de raio igual a 50m, e uma parte final com inclinação de 0% e 15 m de comprimento.

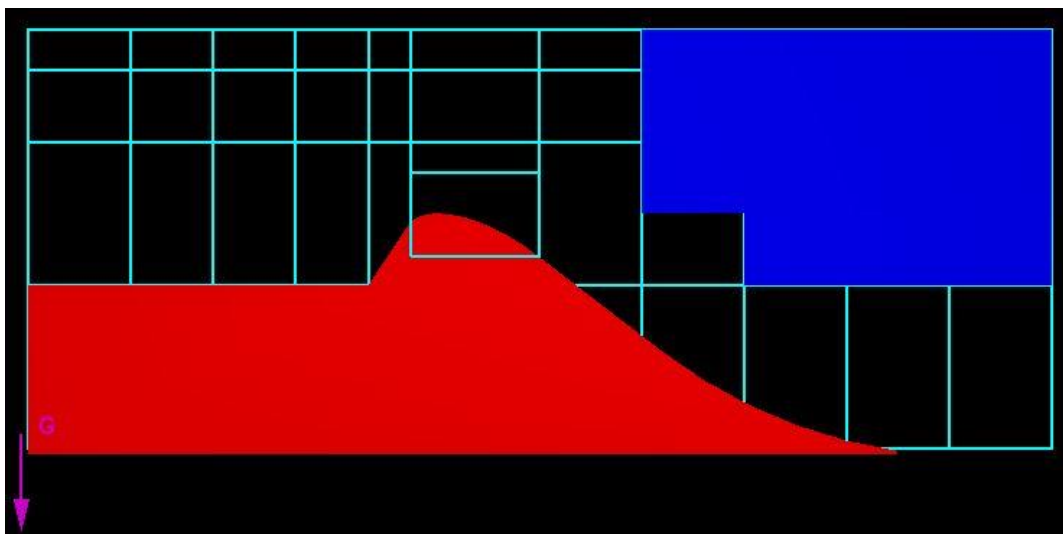


Figura 25 – Soleira WES com paramento inclinado: Configuração do modelo computacional

O atual modelo computacional, representado na Figura 25, tem um comprimento total de 100m e uma altura total de 41m.

A soleira normal do modelo computacional é caracterizada, em termos geométricos e segundo a nomenclatura enunciada na Figura 26, pelos seguintes parâmetros:

- $a/b=2/3$
- $n=1,810$
- $k=1,939$
- $r1=0,48$
- $r2=0,22$
- $r3=0$
- $d1=0,1150$
- $d2=0,2140$
- $d3=2140$

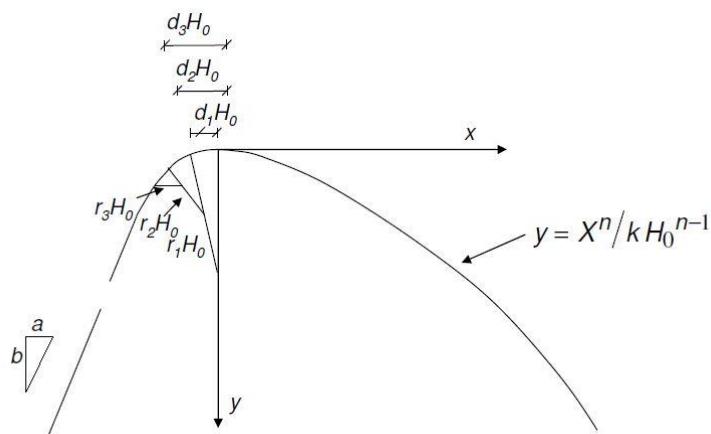


Figura 26 – Soleira WES com paramento inclinado: Características da soleira normal (Lemos, 1981)

5.2.2. MALHA DE CÁLCULO

A malha de cálculo utilizada na resolução do atual modelo computacional é enunciada na Tabela 14.

Tabela 14 – Soleira WES com paramento inclinado: Características genéricas da malha de cálculo

Coordenada - direção X	-40	-30	-22	-14	-6,773	-2,675	9,863	20	30	40	50	60	Total
Número de células		34	33	41	46	33	125	81	64	51	41	34	583
Espaçamento da malha		0,294	0,242	0,195	0,157	0,124	0,1	0,125	0,156	0,196	0,244	0,294	

Coordenada - direção Y	-23	-7	7	14	18	Total
Número de células		128	140	56	25	349
Espaçamento da malha		0,125	0,1	0,125	0,16	

Tal como no modelo computacional do ponto 5.1, para uma melhor representação da configuração geométrica da soleira descarregadora foi utilizado um bloco complementar para refinar a malha. Este bloco complementar situa-se na região onde será posteriormente necessário retirar os resultados para comparação com o modelo físico.

O bloco auxiliar de malha é visível na parte central da Figura 25, sendo que se encontra representado sobre o sólido correspondente ao descarregador. As dimensões do bloco auxiliar de malha são as seguintes: 12,54m de comprimento e 8,2m de altura. As características da malha do referido bloco complementar podem ser observadas na Tabela 15.

Tabela 15 – Soleira WES com paramento inclinado: Características do bloco complementar de malha

Coordenada - direção X	-2,675	9,863	Total
Número de células		251	251
Espaçamento da malha		0,05	

Coordenada - direção Y	-4,202	4	Total
Número de células		161	161
Espaçamento da malha		0,051	

5.2.3. CONDIÇÕES DE FRONTEIRA

As condições de fronteira utilizadas no bloco de malha principal foram as seguintes:

- Plano X mínimo: Pressão específica (*Specific Pressure* - *P*)
- Plano X máximo: Escoamento (*Outflow* - *O*)

- Plano Y mínimo: Simetria (*Symetric* - *S*)
- Plano Y máximo: Simetria (*Symetric* - *S*)
- Plano Z mínimo: Parede (*Wall* - *W*)
- Plano Z máximo: Simetria (*Symetric* - *S*)

A pressão específica do plano X min é igual ao NPA e correspondente à cota de (152,5). Esta pressão corresponde a um desnível do nível da água para a cota máxima de coroamento da soleira de 14m e a um rácio $H/H_d=1,13$. As condições de fronteira do bloco auxiliar de malha são, à semelhança do caso anterior, de simetria em todos os planos para que seja assegurada a continuidade do escoamento nas fronteiras do bloco complementar de malha.

5.2.4 CONDIÇÕES DE ENSAIO

No presente estudo foi tomada a relação de 1,13 entre a altura de montante e a altura de dimensionamento da estrutura real – H/H_d – que é, como referido, a relação do caso de estudo do DCC de Caniçada. O valor da cota de montante é controlado, à semelhança da simulação anterior, pela fronteira X min, com uma pressão específica de entrada, permitindo assim controlar o nível de água na entrada do modelo computacional.

O tempo de cálculo da atual simulação numérica é de 80s. As condições numéricas são de fluido incompressível (água), superfície livre e unidades no sistema internacional, com a temperatura em graus Celcius. Em termos físicos foi considerada uma aceleração gravítica de $9,8065 \text{ m/s}^2$, o modelo de viscosidade RNG, com o comprimento máximo de mistura de turbulência dinâmico e calculado automaticamente, e mistura de ar (*Air Entrainment*) com um coeficiente de mistura de 0,5 e uma tensão superficial de 73 N/m. O fluido utilizado foi a água com uma densidade de 1000 kg/m^3 , uma viscosidade constante de 0,001 e uma compressibilidade de $4.55\text{e-}10 \text{ m}^2/\text{N}$.

Para garantir uma maior estabilidade no enchimento na simulação numérica e atingir mais facilmente a estabilidade no escoamento, foi considerada uma variação do nível de água à entrada. Essa variação é crescente e constante e estabiliza no final de 37,5s. A taxa de crescimento é correspondente a um acréscimo de 1 m.c.a. à pressão específica de entrada a cada 2,5s.

Em termos numéricos, foi utilizado um intervalo mínimo de iteração de 1×10^{-8} . Para o cálculo de convergência foi utilizado o modelo implícito, GMRES. Foi utilizado o cálculo de movimento e transporte de massa por equações de 2ª ordem.

5.2.5 RESULTADOS

Após a simulação numérica do modelo computacional, foram comparados os resultados obtidos com os correspondentes resultados obtidos na simulação física em modelo reduzido. As grandezas a comparar nesta análise são, como referido, o caudal descarregado e as pressões em 4 pontos do fundo do descarregador. Embora existam dados da simulação física respeitantes às velocidades em secções da entrada do descarregador, nos testes preliminares, primeira fase dos ensaios em modelo computacional, a simulação é efetuada em 2D e como tal, não é possível estabelecer a comparação de velocidades. Esta comparação de velocidades é inviável dado que a velocidade em cada ponto de um descarregador deste género é muito dependente da configuração a três dimensões. Dadas as condições de enchimento serem semelhantes, existe portanto uma grande semelhança no processo de enchimento do atual modelo computacional com o modelo computacional anterior, sendo que a configuração de enchimento assemelha-se muito à da Figura 20.

A configuração final do modelo computacional, para $t=80\text{s}$, é a apresentada na Figura 27.

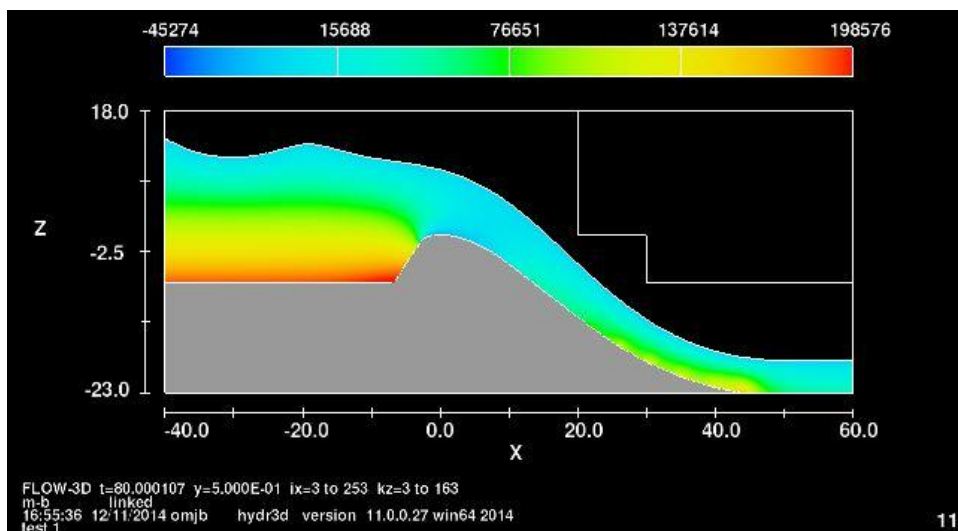


Figura 27 – Soleira WES com paramento inclinado: Configuração final do escoamento

O valor final para o caudal descarregado na simulação numérica é de 114,4 (m³/s)/m. Dado que a secção de entrada do descarregador é composta por dois vãos de 8,75m de largura cada, tem-se que no correspondente modelo a três dimensões, uma descarga de 2002 m³/s. O valor descarregado, de acordo com as simulações em modelo físico reduzido, para uma situação com as comportas totalmente abertas é de 2062 m³/s. O erro do modelo computacional é, portanto, de 60 m³/s, em valor absoluto por defeito, correspondendo a 2,91% de erro em termos relativos. A variação no tempo do caudal descarregado em modelo computacional é exibida na Figura 28.

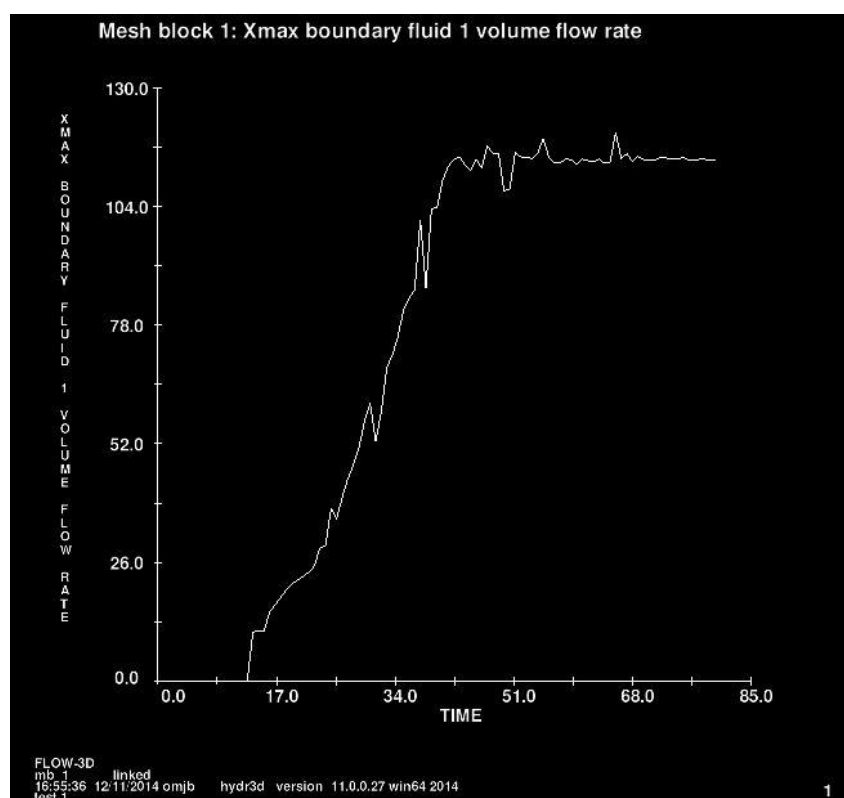


Figura 28 – Soleira WES com paramento inclinado: Evolução do caudal descarregado

Os valores de pressão são extraídos do *software* Flow 3D por duas vias. A primeira forma de extração corresponde à extração através da opção *Neutral file*, esta opção encontra-se descrita e

justificada no ponto 4.1.4 da presente dissertação. O segundo modo de extração utilizado é efetuado com recurso à análise de resultados em diferentes células através da opção *Text Output* do Flow 3D. Este modo consiste na extração das grandezas da célula cujo centro está mais próximo do ponto de medição (coordenada do tubo piezométrico em modelo físico). É consequentemente obtido o valor da pressão no centro da célula mais próxima à coordenada. A posição das tomadas de pressão, em relação ao referencial instalado na crista do descarregador, são as apresentadas na Tabela C 2 do Anexo C, sendo estes os pontos de extração dos resultados de pressão.

Na Tabela 16 é visível a comparação dos valores de pressão entre os dois modelos, para o tempo final de cálculo, $t=80s$, que reflete a situação sob caudal estabilizado em modelo físico. São apresentados na referida tabela os resultados extraídos por *Text Output*, as coordenadas da célula em questão e o correspondente valor em Pa e m.c.a. Para os resultados extraídos por *Neutral File*, são também apresentados os valores de pressão em Pa e m.c.a..

Tabela 16 – Soleira WES com paramento inclinado: Resultados de pressão

Modelo computacional						Modelo Físico		
Text Output			Neutral File			Coordenadas (m)		m.c.a.
Coordenadas de extração (m)		Pa	m.c.a	Pa	m.c.a			
x	z					x	z	
-2,051	-0,407	383,55	0,04	5,07E+02	0,05	-2,051	-0,406	0,72
-0,003	0,001	-35227,75	-3,59	-3,52E+04	-3,59	0	0	0,06
2,545	-0,356	-7946,29	-0,81	-7,95E+03	-0,81	2,542	-0,36	-1,13
7,990	-2,852	-2431,67	-0,25	-2,43E+03	-0,25	7,998	-2,873	0,21

Na Figura 29 é estabelecida a comparação gráfica entre os valores de pressão obtidos através da modelação numérica (para o resultados extraídos por via de *Text Output* e *Neutral File*) e os valores obtidos na modelação física em modelo reduzido.

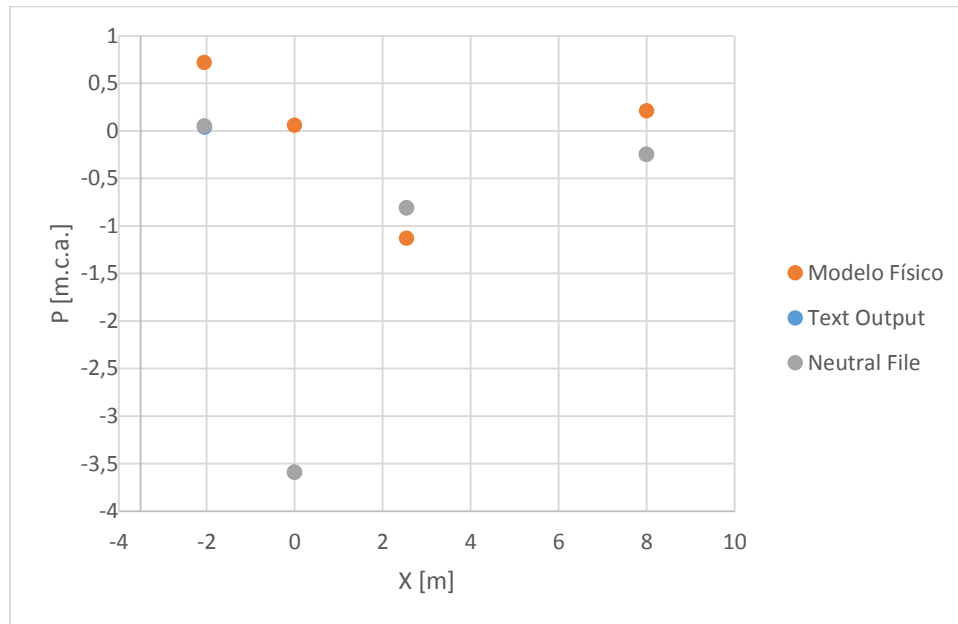


Figura 29 – Soleira WES com paramento inclinado: Dispersão dos valores de pressão

Nos resultados alcançados é de salientar a quase insignificância do modo de extração sobre os valores obtidos, tal como é visível na Figura 29, e a maior diferença nos resultados obtidos para a posição da tomada de pressão 2, da zona da crista do descarregador, à semelhança do que havia sido denotado nas simulações numéricas anteriores.

Do estudo levado a cabo para a atual geometria, sobressai no aspeto da superfície livre do escoamento, tal como pode ser observado na Figura 27, a existência de uma onda na parte inicial do modelo. Esta instabilidade na zona de aproximação do escoamento à soleira descarregadora poderá condicionar a validade dos resultados pelo que deverão ser realizados mais ensaios e testes de sensibilidade/calibração para estimar a influência dessa oscilação nos resultados de pressão e caudal obtidos.

5.3 TESTES DE SENSIBILIDADE EM MODELO 2D

Os testes de sensibilidade têm como objetivo o estudo da influência de diferentes fatores numéricos no modelo computacional. Além da oscilação inicial, referida anteriormente, existem parâmetros que devem ser estudados para que se obtenha uma sensibilidade acerca da sua influência no comportamento do modelo computacional, tais como a velocidade inicial, dimensão da malha, utilização de equações de resolução de massa e movimento de primeira ou segunda ordem e dimensão total do modelo (zona de aproximação e de saída). Deste modo, devem ser desenvolvidos ensaios de modo a que se verifique a robustez e a suscetibilidade dos resultados à variação destes parâmetros.

5.3.1. INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DE EQUAÇÕES DO MOVIMENTO DE 1ª OU 2ª ORDEM

5.3.1.1 Condições de Ensaio

Foi desenvolvido um modelo computacional com as mesmas configurações geométricas do anterior modelo, com o intuito de estimar a influência da opção, em termos numéricos, de equações de 1ª ordem em detrimento das de 2ª ordem. A maioria dos trabalhos desenvolvidos na área da simulação numérica de escoamentos em superfície livre são desenvolvidos com recurso a equações de segunda ordem. No entanto foi considerado proveitoso estudar a influência desta escolha nos resultados finais em termos de pressão, caudal escoado e velocidade de resolução para a correspondente simulação numérica.

O teste desenvolvido tem a mesma configuração geométrica da Figura 25 e uma malha com as características descritas no ponto 5.2.2., com uma malha genérica e um bloco complementar, descritos na Tabela 14 e Tabela 15, respetivamente. A evolução da adução de água ao modelo computacional é também análoga com o acréscimo de 1 m.c.a. à pressão específica de entrada a cada 2,5s. A diferença entre os dois modelos reside nas características numéricas dos mesmos, sendo que a advecção do fluido é calculado na nova simulação com base em equações de 1ª ordem.

5.3.1.2 Resultados

Após o cálculo do modelo computacional, não são visíveis diferenças no aspeto da superfície livre do escoamento em relação ao aspeto obtido na simulação do ponto 5.2. O aspeto final do escoamento, para o tempo de 80s, é então semelhante à demonstrada na Figura 27.

O caudal descarregado para a atual simulação, com cálculo do momento de advecção por equações de 1ª ordem, é de 114,67 m³/s, correspondendo a um caudal para o correspondente

modelo 3D de 2007 m³/s. Estes valores indicam um erro absoluto, por defeito, de 55 m³/s e um erro relativo de 2,67 %. O valor obtido para o caudal é muito semelhante aos 114,4 m³/s para o caso 2D (2002 m³/s para o caso 3D), não se denotando diferenças significativas no caudal escoado.

Os pontos de medição de pressão para o atual modelo computacional correspondem também aos enunciados na Tabela C 2 do Anexo C, sendo estes pontos correspondentes às coordenadas das tomadas de pressão no modelo físico reduzido do DCC. Os valores obtidos para as pressões nos referidos pontos são os especificados na Tabela C2 do Anexo C. É possível observar da análise dos resultados obtidos que não existe uma diferença substancial nos valores de pressão. É no entanto de destacar que o valor da primeira tomada de pressão é, no presente ensaio, negativo.

A comparação gráfica dos valores obtidos é visível na Figura 30. Como é notório nessa imagem, por comparação com a Figura 29, não existe uma diferença substancial dos resultados obtidos em relação aos obtidos por cálculo do movimento por equações de segundo grau. No que respeita ao tempo de cálculo, a diferença também não é substancial. O tempo total de simulação para o caso de resolução das equações de movimento por equações de segundo grau (caso do ponto 5.2) é de 7 horas, 52 minutos e 10 segundos e para o caso de resolução das equações de movimento por equações de 1º grau é de 7 horas, 34 minutos e 10 segundos. A diferença situa-se então, em termos absolutos, no acréscimo de 18 minutos ao tempo de cálculo. Em termos relativos este valor corresponde a um acréscimo inferior a 4% ao tempo total de simulação.

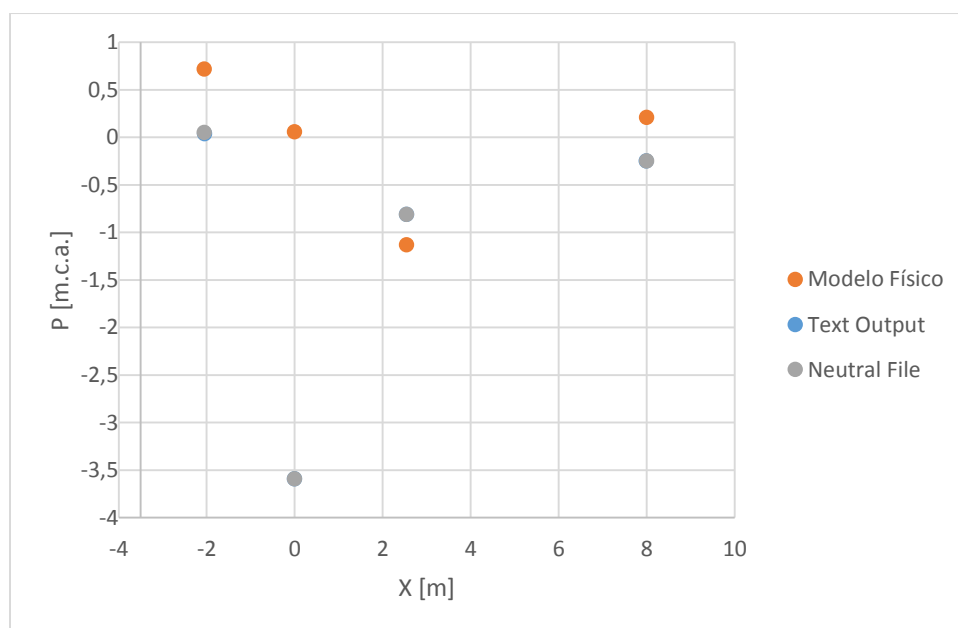


Figura 30 – Soleira WES com paramento inclinado e equações do movimento de 1ª ordem: Dispersão dos valores de pressão

Do presente estudo é possível concluir então que o uso de equações de 2ª ordem para o cálculo do movimento é benéfico dado que, embora não exista um incremento demasiado significativo da precisão dos resultados, a diferença em termos de tempo de cálculo é muito reduzida.

5.3.2. INFLUÊNCIA DO REFINAMENTO DA MALHA

5.3.2.1 Condições de Ensaio

A definição da dimensão da célula de cálculo é uma parte preponderante na formulação de um modelo computacional. Como referido ao longo do capítulo 3, esta definição tem influência direta sobre a precisão dos resultados, tempo de cálculo e representação geométrica fidedigna dos objetos. A influência da dimensão da célula na representação das características geométricas foi já demonstrada no ponto 5.1.2. sendo que uma malha mais refinada traduz-se numa melhor representação geométrica. No entanto, o refinamento excessivo pode comportar incrementos de tempo de simulação inportáveis em termos computacionais. Para testar a influência da dimensão da malha no tempo de cálculo e na precisão dos resultados obtidos foi construído um novo modelo computacional semelhante aos anteriores, diferindo apenas na dimensão das células de cálculo.

Tabela 17 – Soleira WES com paramento inclinado e malha refinada: Características da malha

Coordenada - direção X	-40	-30	-22	-14	-6,773	-2,675	9,863	20	30	40	50	60	Total
Número de células	68	66	82	92	66	250	162	128	102	82	68		1166
Espaçamento da malha	0,147	0,121	0,098	0,079	0,062	0,05	0,063	0,078	0,098	0,122	0,147		

Coordenada - direção Y	-23	-7	7	14	18	Total
Número de células	256	280	112	50		698
Espaçamento da malha	0,063	0,05	0,063	0,08		

O modelo computacional desenvolvido contempla portanto a mesma configuração geométrica da Figura 25 e uma malha com metade da dimensão da malha descrita no ponto 5.2.2. As características da malha utilizada neste novo ensaio podem ser observadas na Tabela 17.

O bloco de malha complementar utilizado na presente simulação preserva as características descritas na Tabela 15. A dimensão mínima do atual bloco de malha principal, corresponde às características já existentes no bloco complementar das simulações do ponto 5.2 e 5.3.1, pelo que é assegurada uma boa representação das características geométricas do descarregador. A evolução da adução de água ao modelo computacional é também igual aos dois modelos anteriores, com o acréscimo de 1 m.c.a. à pressão específica de entrada a cada 2,5s.

5.3.2.2 Resultados

Tal como no ponto 5.3.1, na presente simulação não são notórias diferenças substanciais no aspeto da superfície livre no escoamento quando comparado com a simulação numérica do ponto 5.2. Sendo a configuração final do escoamento, para o tempo de 80s, semelhante à demonstrada na Figura 27.

O caudal descarregado para o tempo final de simulação é de 113,74 m³/s, correspondendo a um caudal no correspondente modelo 3D de 1991 m³/s. Estes valores indicam um erro absoluto por defeito de 71 m³/s (para os 2062 m³/s do modelo físico reduzido) e um erro relativo de 3,44 %. O valor obtido para o caudal é muito semelhante aos 114,39 m³/s e 114,67 m³/s dos dois modelos anteriores. Não é notória, portanto, uma diferença nos resultados finais do volume escoado por unidade de tempo. As diferenças existentes no caudal descarregado no presente modelo para os anteriores é também justificada pela oscilação do caudal. Essa oscilação é visível na Figura 21 e na Figura 28, correspondentes à evolução dos caudais descarregados para as diferentes simulações. Os pontos de medição de pressão são enunciados na Tabela C 2 do Anexo C, e correspondem, tal como nos ensaios anteriores, às coordenadas das tomadas de pressão no modelo físico. Os valores de pressão foram extraídos através dos modos de extração *Neutral File* e *Text Output* e são visíveis na Tabela C3 do Anexo C.

Não existem diferenças significativas nos resultados de pressão obtidos para o presente modelo em comparação com o modelo do ponto 5.2., visíveis na Tabela 16 da presente dissertação. Como tal, poder-se-á afirmar que os resultados obtidos em 5.2. são robustos e a precisão dos mesmos não é afetada de forma significativa com o incremento do número de células de cálculo. Na Figura 31 é possível observar a comparação gráfica dos valores obtidos para a presente simulação numérica com os resultados obtidos na modelação física. No presente ensaio não foi verificada uma diferença mínima para os dois modos de extração (*Neutral File* e *Text Output*) para alguns pontos de medição. O refinamento da malha permite que existam mais células próximas aos pontos de medição em questão, pelo que a obtenção de um valor mais próximo do ponto de medição no caso da extração por *Text Output* poderá justificar a referida diferença.

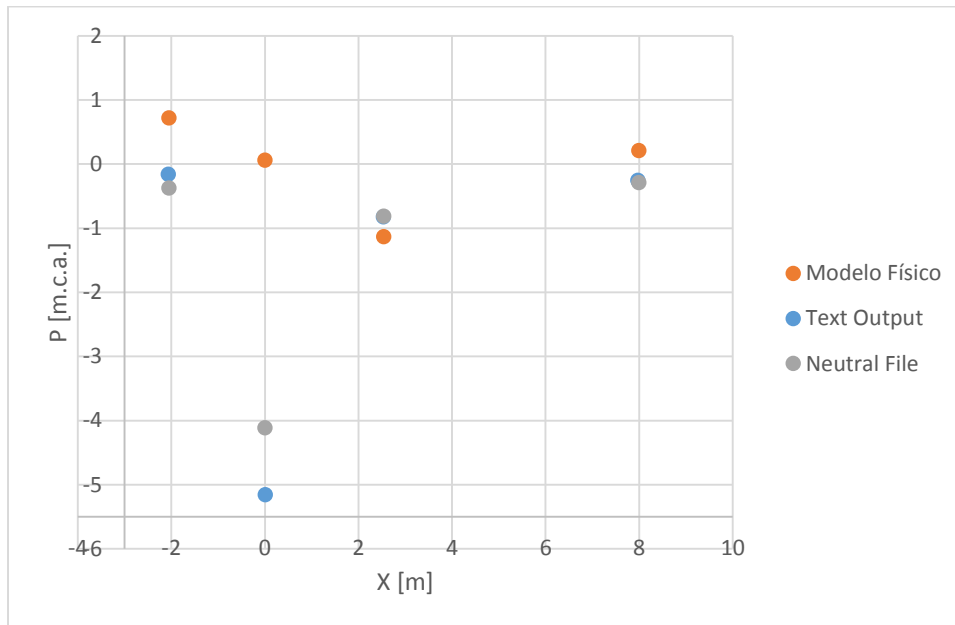


Figura 31 – Soleira WES com paramento inclinado e malha refinada: Dispersão dos valores de pressão

Em termos de tempo total de simulação existe um aumento muito considerável para a presente simulação. A resolução da atual simulação numérica demorou um total de 2 dias, 9 horas, 51 minutos e 44 segundos. Este valor é muito elevado quando comparado com as 7 horas, 52 minutos e 10 segundos do modelo do ponto 5.2. Corresponde portanto a um incremento de 2 dias, 1 hora, 59 minutos e 26 segundos ao tempo total de simulação o que representa em termos relativos um aumento de 632% ao tempo de cálculo.

Este aumento de mais de seis vezes do tempo de simulação não é congruente com o acréscimo de precisão obtido na representação geométrica do modelo e/ou na exatidão dos resultados. Como tal, o potencial aumento de precisão no cálculo do modelo fica injustificado pelo aumento muito pronunciado do tempo de cálculo.

5.3.3. INFLUÊNCIA DO EMULSIONAMENTO DE AR

5.3.3.1 Condições de Ensaio

Tal como referido na secção 5.1.5., a consideração dos fenómenos de emulsão de ar podem levar a diferenças nos resultados obtidos. Sendo o emulsão de ar um fenómeno que está muito relacionado com o tipo de escoamento e este sendo muito dependente das características geométricas do caso em estudo, é necessário estimar a influência do emulsão de ar para o modelo com a atual configuração geométrica.

Os ensaios anteriormente realizados no decorrer do ponto 5.3 da presente simulação consideraram, em termos físicos, os fenómenos de emulsão de ar. O atual ensaio é portanto equivalente ao ensaio do ponto 5.2 da presente dissertação, residindo a diferença na não consideração deste fenómeno físico.

5.3.3.2 Resultados

Da simulação numérica produzida no atual teste preliminar resultou um caudal final escoado de 114,83 m³/s, correspondente a 2010 m³/s no correspondente modelo 3D. Este valor corresponde a um desvio absoluto, por defeito, de 52 m³/s e 2,52% em termos relativos em relação aos resultados em modelo físico. Os resultados para o modelo sem cálculo de emulsão de água não diferem portanto dos modelos anteriores no que concerne ao caudal debitado pelo descarregador, sendo os valores então obtidos concordantes com as simulações já realizadas.

Os resultados obtidos em termos de cálculo de pressões encontram-se na Tabela C4 do Anexo C. Para o atual modelo sem emulsão de ar, os valores de pressão são mais dispersos dos resultados da modelação física por comparação com o modelo com emulsão de ar. A dispersão dos resultados do atual modelo pode ser observada na Figura 32.

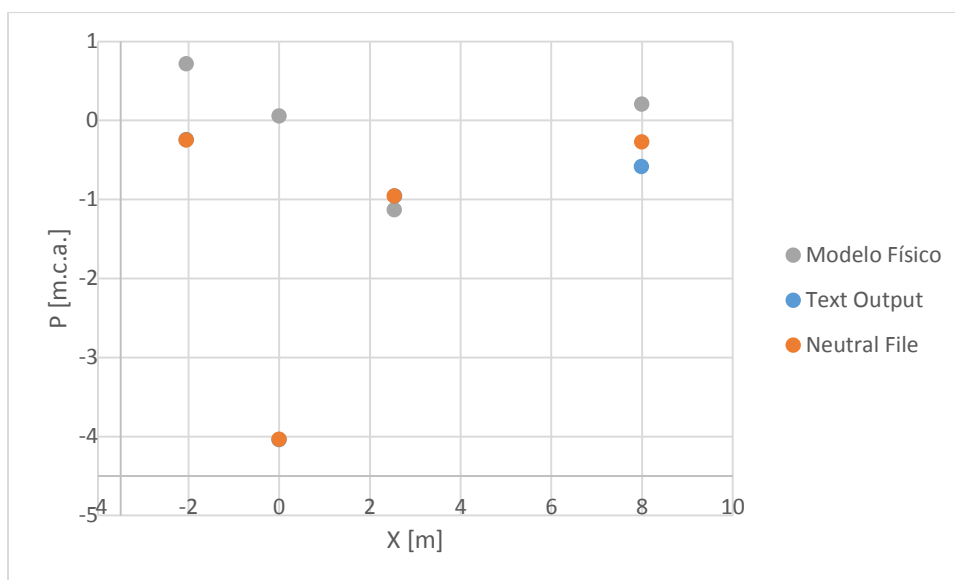


Figura 32 – Soleira WES com paramento inclinado sem emulsão de ar: Dispersão dos valores de pressão

5.3.4. MODELO COM VELOCIDADE INICIAL NA FRONTEIRA X MIN

5.3.4.1 Condições de Ensaio

Um dos problemas identificados aquando da análise dos resultados do modelo computacional enunciado no ponto 5.2. tem que ver com a configuração final do escoamento, representada na Figura 27. Nessa configuração, existe uma sobrelevação da superfície livre na região de aproximação à soleira após a secção de entrada, uma espécie de onda. Esta configuração do fluido na secção de aproximação carece de um estudo da influência da velocidade na secção inicial sobre o escoamento na soleira descarregadora. O desnível entre a crista da soleira e a plataforma de aproximação é reduzido, apenas 7 metros, em contraste com o total de 21 metros de coluna de água na zona de aproximação. Este rácio pequeno entre a lâmina de água acima da crista e a altura do escoamento na aproximação, poderá levar a que exista uma influência da velocidade de

aproximação no escoamento, mesmo tendo em conta que a entrada do descarregador se situa a 30 m de distância.

Para estimar a influência da velocidade inicial do escoamento na formação desta instabilidade inicial foi formulado um modelo semelhante ao modelo computacional reproduzido no ponto 5.2., sendo que a diferença entre os dois modelos reside na condição de fronteira para o plano de X mínimo. Nesta secção, secção de entrada, é induzida uma velocidade inicial de acordo com os resultados experimentais em modelo físico reduzido. O modelo desenvolvido tem um comprimento total de 120 metros, uma altura total de 41 metros, sendo as características da malha utilizada as especificadas na Tabela 18.

Tabela 18 – Soleira WES com paramento inclinado com velocidade inicial: Características da malha

Coordenada - direção X	-60	-50	-40	-30	-22	-14	-6,773	-2,675	9,863	20	30	40	50	60	Total
Número de células		23	28	34	33	41	46	33	125	81	64	51	41	33	120
Espaçamento da malha		0,435	0,357	0,294	0,242	0,195	0,157	0,124	0,1	0,125	0,156	0,196	0,244	0,303	633

Coordenada - direção Y	-23	-7	7	14	18	Total
Número de células		128	140	56	25	41
Espaçamento da malha		0,125	0,1	0,125	0,16	349

De referir que a única diferença da malha do atual modelo para a malha do modelo do ponto 5.2. e cujas características se apresentam na Tabela 14, é o incremento da zona de aproximação em 20 metros. As características da malha no plano vertical mantêm-se em relação ao modelo computacional enunciado no ponto 5.2 da presente dissertação.

As características do modelo para o tempo inicial são diferentes dos modelos anteriores por incompatibilidade da condição de enchimento gradual do modelo computacional com a necessidade da definição da velocidade inicial. Como tal, foi adotada uma configuração inicial com um nível de água à cota do NPA (152,5) e com um comprimento total de 60 metros – até à crista do descarregador. A configuração inicial pode ser observada na Figura 33.

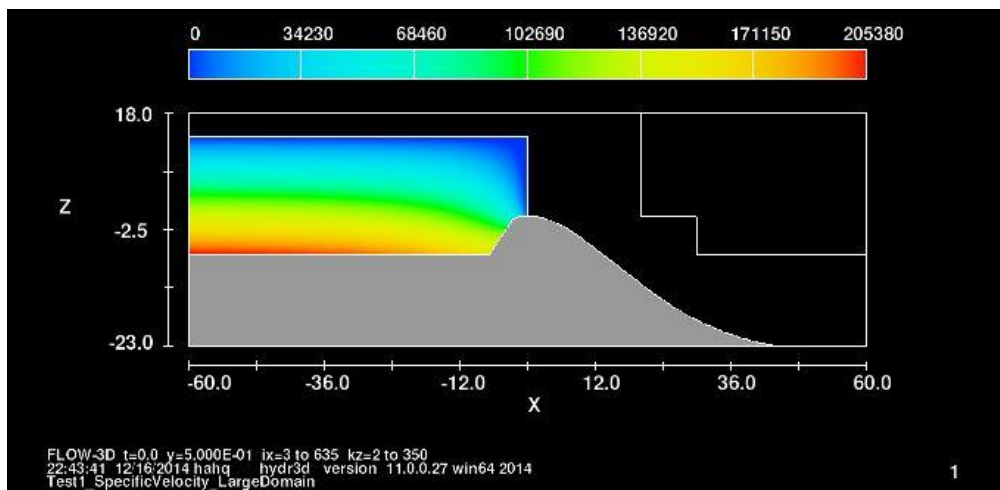


Figura 33 – Soleira WES com paramento inclinado com velocidade inicial: Configuração inicial

O caudal a descarregar para a situação com as comportas totalmente abertas, de acordo com as simulações em modelo físico, é de 2062 m³/s. Foi efetuado o cálculo para a obtenção do valor descarregado por metro de desenvolvimento lateral do descarregador. Sendo que o descarregador é composto por dois vãos de 8,75 metros cada, o valor de 2062 m³/s foi dividido pela distância total de 17,5 m (correspondente aos dois vãos de 8,75m), obtendo-se um valor de caudal unitário, para o modelo 2D, de 117,83 m³/s por metro de desenvolvimento. Partindo deste valor e sabendo

que o desnível da secção de entrada em relação ao patamar de aproximação correspondente ao NPA é de 21m de altura, chegou-se ao valor de 5,611 m/s para a velocidade de entrada no modelo. Após estas considerações, as condições de fronteira para o plano X min correspondem a uma elevação do fluido de 14 metros acima da crista da soleira (cota do NPA) e uma velocidade de entrada segundo a direção X de 5,611 m/s.

Em termos numéricos foram consideradas as mesmas condições que o modelo do ponto 5.2. da presente dissertação. No modelo desenvolvido foi também tida em consideração a influência do emulsioneamento de ar no escoamento.

5.3.4.2 Resultados

Após simulação e estabilização do fluido descarregado para o atual modelo computacional ($t=80s$) foi analisada a configuração final do escoamento, o caudal descarregado e as pressões em 4 pontos de medição (Tabela C2 do Anexo C). A configuração final é visível na Figura 34.

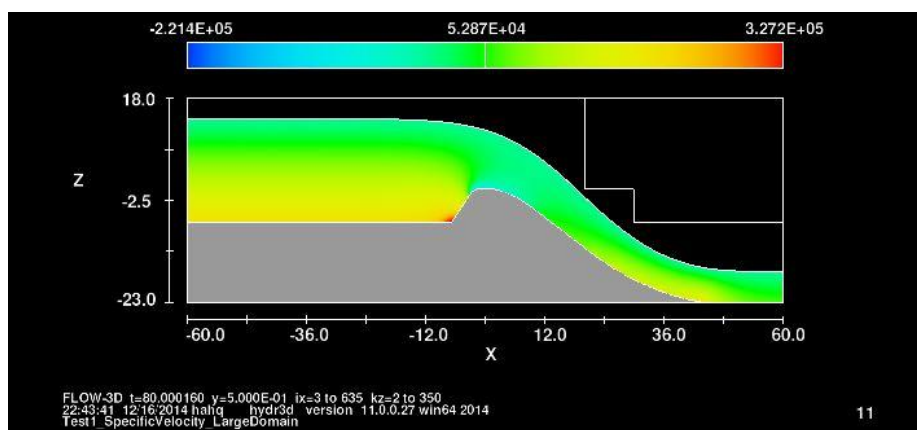


Figura 34 – Soleira WES com paramento inclinado com velocidade inicial: Configuração final

Como pode ser observado na Figura 34, com a utilização da velocidade inicial para a fronteira X min, a anterior instabilidade visível na zona de aproximação (observável na Figura 27) já não existe. Deste modo poder-se-á afirmar que existe uma influência do patamar de aproximação no desenvolvimento do escoamento.

É possível observar por análise do gráfico da Figura 35, que o caudal descarregado no modelo computacional é da ordem dos 150 m³/s/m. O valor obtido é superior ao valor de 117,8 m³/s, espectável para o caudal. O caudal descarregado para o tempo de 80 segundos é de 157,4 m³/s, tempo final de simulação. O valor obtido faz corresponder a um caudal de 2755 m³/s para a situação em modelo 3D. Não sendo este um valor correspondente aos valores obtidos na simulação física, a simulação numérica com velocidade inicial não é representante da situação real do descarregador.

Para um controlo rigoroso dos resultados de pressão, e muito embora o caudal não seja coincidente com o valor medido em modelo reduzido, foi realizada uma comparação dos valores de pressão para os 4 pontos referidos. Os valores obtidos para a pressão na presente simulação numérica encontram-se descritos na Tabela C5 do Anexo C. É possível observar a discrepância entre os valores obtidos para a simulação numérica e a simulação em modelo físico reduzido, sendo evidente que a presente simulação não traduz o escoamento para o DCC de Caniçada.

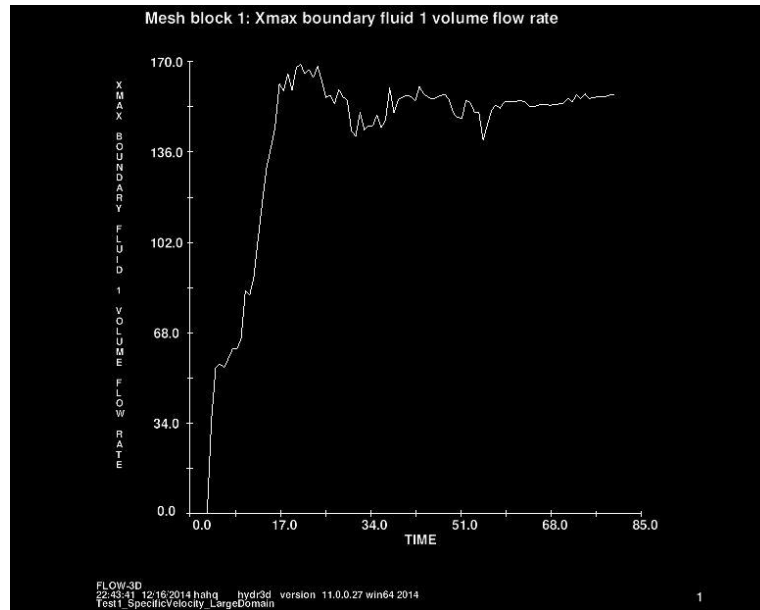


Figura 35 – Soleira WES com paramento inclinado com velocidade inicial: Evolução do caudal escoado

5.3.5. MODELO CAUDAL FIXO DE ENTRADA

5.3.5.1 Condições de Ensaio

Após a realização do teste preliminar com a consideração de velocidade inicial, foi notório que esse procedimento não poderia ser solução para a resolução da instabilidade do modelo na zona de aproximação. Para se poder aferir a incongruência do caudal descarregado pelo modelo produzido no ponto 5.3.4 e a sua relação com a velocidade inicial produziu-se um novo modelo computacional em que na fronteira de X min é imposto um caudal fixo de entrada e uma elevação igual ao NPA. O modelo é semelhante ao modelo computacional do ponto 5.3.4, residindo a diferença na condição de fronteira do plano X min, composta por um caudal fixo, igual a 117,829 m³/s e uma altura específica de 14 metros (NPA) em relação à crista do descarregar (cota 0).

As condições numéricas e físicas do modelo são similares às consideradas no modelo produzido em 5.2. As condições iniciais, em termos de região do fluido, são iguais à do modelo computacional do ponto anterior (ponto 5.3.4), sendo a perspetiva inicial igual à da Figura 33.

5.3.5.2 Resultados

Após estabilização do escoamento (t = 80 s) a configuração obtida é a visível na Figura 36.

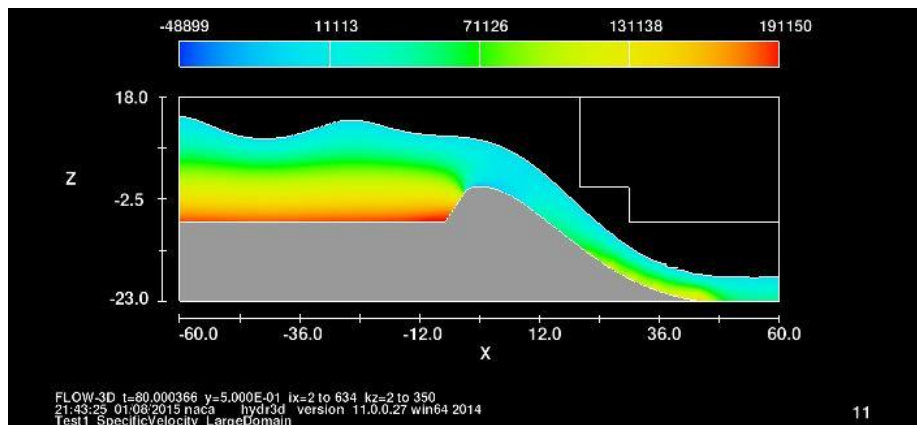


Figura 36 – Soleira WES com paramento inclinado com caudal fixo: Configuração final

Como pode ser observado na Figura 36, a instabilidade inicial mantém-se, no entanto, a instabilidade do fluido é menor que a observada no modelo do ponto 5.2. A variação do caudal ao longo do tempo é descrita na Figura 37.

O valor do caudal descarregado, em termos numéricos, para a situação final ($t=80s$), é de $118,4 \text{ m}^3/s$. Este valor representa um caudal no correspondente modelo a três dimensões de $2072 \text{ m}^3/s$, o que constitui um desvio absoluto por excesso de $10 \text{ m}^3/s$ e um desvio relativo por excesso de $0,5\%$. Estes valores são muito satisfatórios dado que não existe uma mudança significativa na configuração da superfície livre do escoamento e existe uma redução do erro associado ao caudal descarregado para um valor quase nulo.

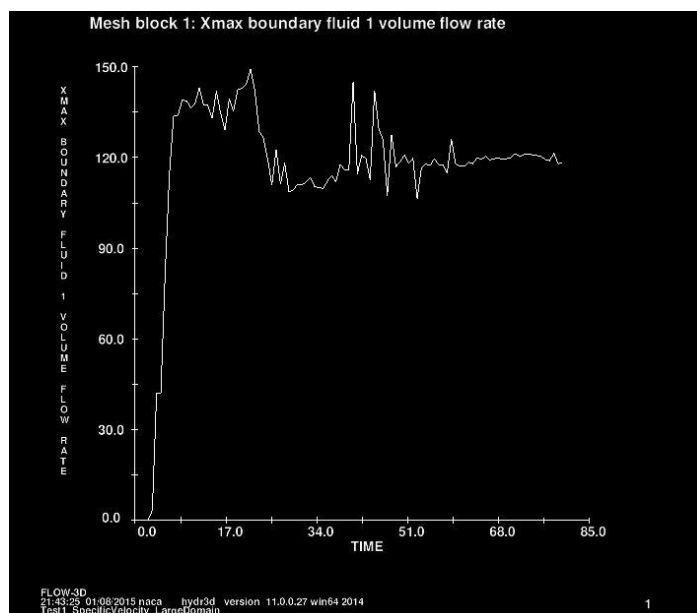


Figura 37 – Soleira WES com paramento inclinado com caudal fixo: Evolução do caudal descarregado

Para a validação do atual modelo computacional, são de seguida comparados os valores de pressão para atual simulação. Podem ser observados os valores obtidos para a pressão na atual simulação numérica do modelo computacional na Tabela C6 do Anexo C, cuja dispersão é representada na Figura 38.

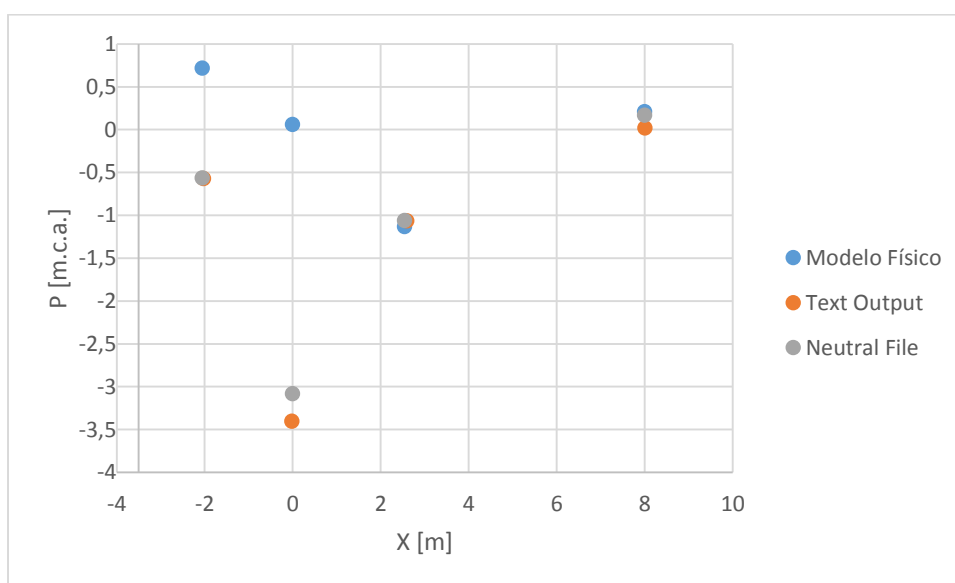


Figura 38 – Soleira WES com paramento inclinado com caudal fixo: Dispersão dos valores de pressão

Da análise da dispersão dos resultados visível na Figura 38, é possível observar que o atual modelo é mais assertivo que todos os anteriores para as tomadas de pressão 3 e 4. Nos referidos pontos existe uma relação muito próxima entre os valores medidos no modelo físico reduzido e os valores obtidos pelo cálculo numérico.

5.3.6. MODELO COM ZONA DE APROXIMAÇÃO REDUZIDA E CAUDAL FIXO

5.3.6.1 Condições de Ensaio

Para estimar de uma forma eficaz a influência da oscilação inicial (Figura 27 e Figura 36), sobre os resultados de pressão, foi desenvolvido um novo modelo com uma zona de aproximação mais reduzida e caudal pré-estabelecido, à semelhança do modelo 5.3.5. As considerações numéricas e físicas são análogas ao modelo de 5.2., apenas diferindo a condição inicial, visível na Figura 39 para o presente modelo, e a condição de fronteira em X min, à semelhança da simulação 5.3.5.

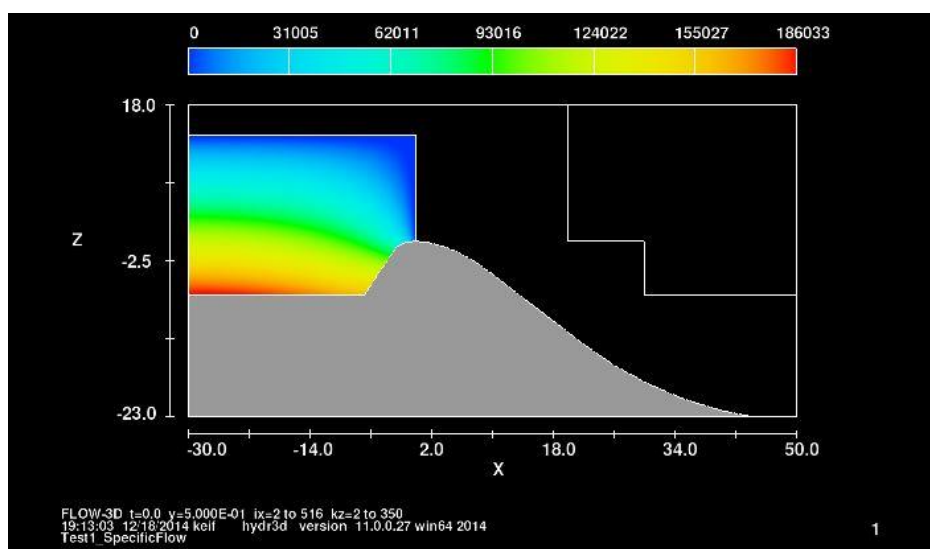


Figura 39 – Soleira WES com paramento inclinado com domínio reduzido: Configuração inicial

O modelo desenvolvido na presente simulação tem 80 metros de comprimento e 41 metros de altura, sendo que o patamar de aproximação se restringe aos 20 metros antecedentes à soleira descarregadora. A malha utilizada no presente modelo pode ser observada na Tabela 19.

Tabela 19 – Soleira WES com paramento inclinado com domínio reduzido: Malha de cálculo

											Total
Coordenada - direção X	-30	-22	-14	-6,773	-2,675	9,863	20	30	40	50	80
Número de células		33	41	46	33	125	81	64	51	41	515
Espaçamento da malha		0,242	0,195	0,157	0,124	0,1	0,125	0,156	0,196	0,244	

						Total
Coordenada - direção Y	-23	-7	7	14	18	41
Número de células		128	140	56	25	349
Espaçamento da malha		0,125	0,1	0,125	0,16	

5.3.6.2 Resultados

O tempo de simulação do atual modelo é de 80 segundos, sendo a configuração final após simulação a que se apresenta na Figura 40. Para $t=80s$ é descarregado no modelo computacional um caudal de $117,96 \text{ m}^3/s$ em modelo 2D, correspondente a um caudal em modelo 3D de 2064

m^3/s . Este valor por comparação com o modelo físico reduzido, apresenta um de um erro absoluto por excesso de $2 \text{ m}^3/\text{s}$ e um erro relativo de 0,1%.

De salientar nos resultados obtidos a configuração final do escoamento apresentada na Figura 40, a não existência de oscilação na zona de aproximação. A inexistência deste fenómeno, registado em casos anteriores, poderá estar relacionada com a diminuição do domínio e, como tal, a zona de aproximação não tem um comprimento suficiente para possibilitar a ocorrência do mesmo.

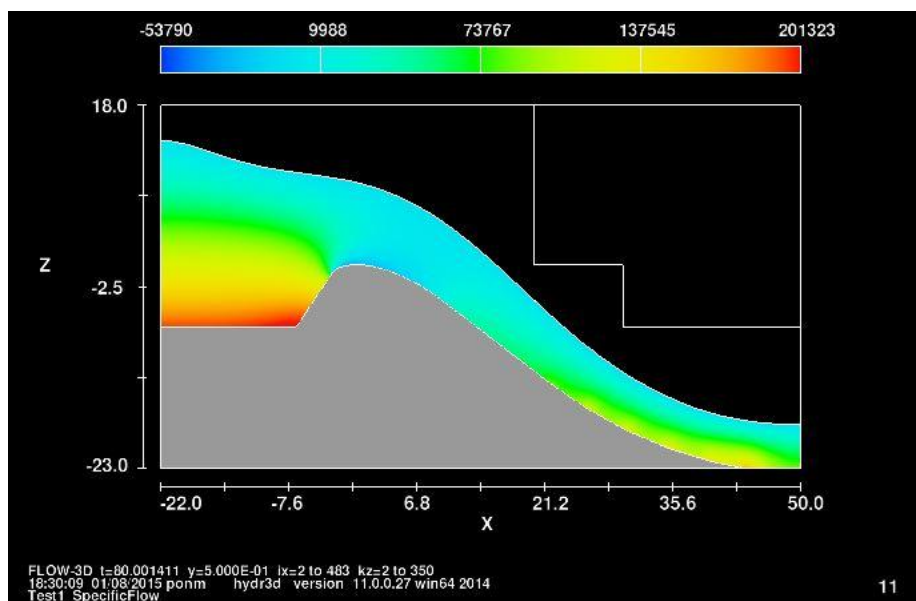


Figura 40 – Soleira WES com paramento inclinado com domínio reduzido: Configuração final

Para o atual modelo foram efetuadas medições nos quatro pontos correspondentes às tomadas de pressão do modelo físico reduzido. Esses mesmos valores são enunciados na Tabela C7 do Anexo C. Na Figura 41 é possível observar a comparação dos resultados entre o atual modelo, com domínio reduzido e caudal fixo, e o modelo físico. É possível observar a maior dispersão na parte inicial do modelo, à semelhança do que já havia sido verificado no ponto anterior, para situação de caudal fixo.

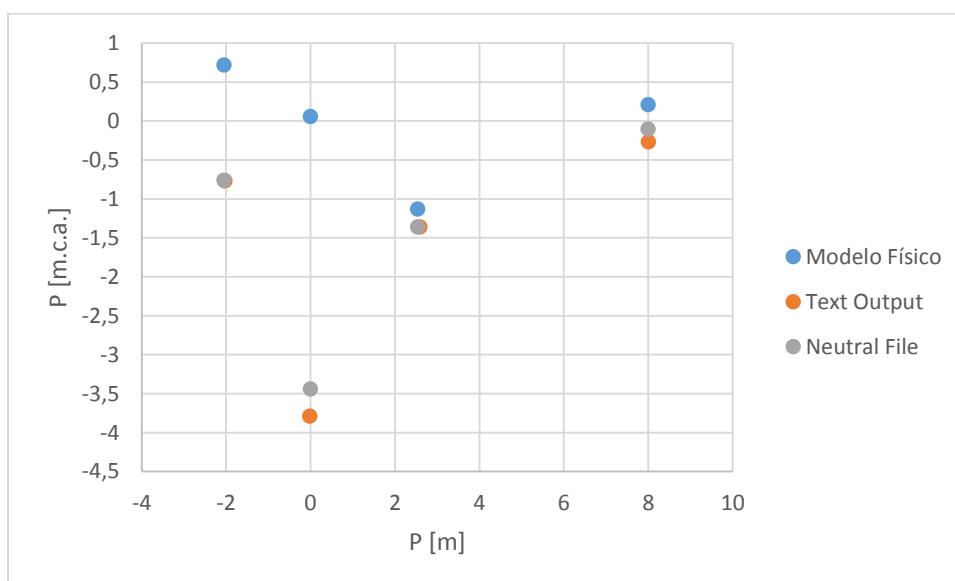


Figura 41 – Soleira WES com paramento inclinado com domínio reduzido: Dispersão dos valores de pressão

A utilização da condição inicial de caudal fixo em detrimento de uma pressão específica para a secção de entrada afigura-se como uma boa opção nomeadamente no que concerne ao caudal descarregado e posteriormente, em 3D, à medição de alturas do escoamento.

5.3.7. MODELO COM ZONA DE APROXIMAÇÃO REDUZIDA E PRESSÃO ESPECÍFICA DE ENTRADA

5.3.7.1 Condições de Ensaio

Por fim, para se obter uma sensibilidade maior acerca da influência da opção de caudal fixo de entrada em detrimento de um valor específico de pressão para essa fronteira, foi também desenvolvido um modelo com a zona de aproximação reduzida e uma altura de escoamento de entrada fixo e à cota do NPA. O modelo desenvolvido apresenta portanto características análogas ao modelo do ponto 5.3.6., no que concerne às condições iniciais (Figura 39) e as características da malha (Tabela 19).

5.3.7.2 Resultados

A configuração final do escoamento para o presente modelo pode ser observada na Figura 42.

Pela observação da Figura 42, e por contraste com a Figura 40 é de salientar, a maior inflexão do escoamento na zona de aproximação à soleira descarregadora.

O caudal descarregado no presente modelo é de 116,21 m³/s, correspondente em modelo 3D a 2034 m³/s. Estes valores significam um erro absoluto por defeito de 28 m³/s e um erro relativo de 1,4%. Quando comparado o caudal com o valor descarregado pelo modelo do ponto 5.2. (caudal descarregado em correspondente modelo 3D de 2002 m³/s) existe uma melhoria dos resultados obtidos. Esta melhoria poderá estar relacionada com a maior estabilidade do escoamento visível na Figura 42. Esta comparação é possível pois as condições do modelo são semelhantes, apenas diferindo no comprimento da zona de aproximação.

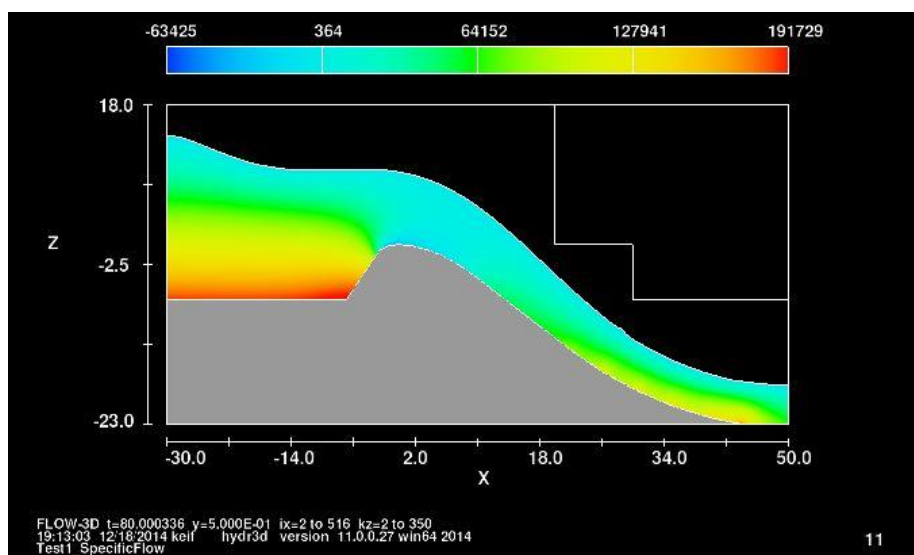


Figura 42 – Soleira WES com paramento inclinado com domínio reduzido e pressão específica:
Configuração final

Os valores de pressão para o modelo atual encontram-se descritas na Tabela C 8 do Anexo C. Na Figura 43 é possível observar a dispersão dos resultados do atual modelo – modelo com zona de

aproximação reduzida e altura de escoamento de entrada fixo – e os resultados obtidos para a simulação física em modelo reduzido. É possível observar que a instabilidade dos resultados na zona inicial se mantém e que não são afetados significativamente pela opção de ponto fixo de entrada em detrimento de um volume de fluido de admissão ao sistema por unidade de tempo.

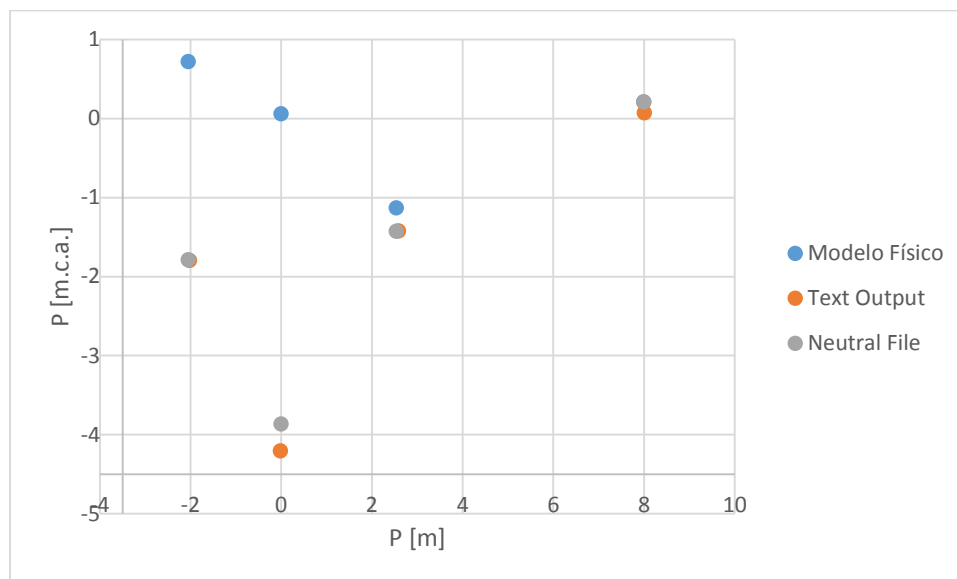


Figura 43 – Soleira WES com paramento inclinado com domínio reduzido e pressão específica: Dispersão dos valores de pressão

5.4. TESTES DE SENSIBILIDADE EM MODELOS 3D

Findas as análises de sensibilidade em 2D para a elaboração do modelo computacional final, obteve-se uma sensibilidade a certos parâmetros, os quais estão definidos e para os quais existe uma garantia de melhor capacidade de cálculo e/ou adaptabilidade aos resultados ao caso de estudo. Como tal, poder-se-á concluir que é favorável o cálculo do movimento através de equações de 2ª ordem, em detrimento do cálculo por equações de 1ª ordem, como é notório através do teste de sensibilidade do ponto 5.3.1. Conclui-se também que a malha utilizada se adequa ao modelo computacional em questão, garantindo uma boa representação das características geométricas e não comprometendo significativamente o tempo de cálculo, o que foi demonstrado no ponto 5.3.2. Através do teste de sensibilidade presente no ponto 5.3.3 é possível concluir que a utilização do emulsãoamento de ar (*Air Entrainment*) se afigura positiva para o cálculo fidedigno do modelo computacional, não comprometendo significativamente o tempo de cálculo. Como demonstrado no ponto 5.3.4, a consideração de velocidade de entrada no modelo constitui uma boa solução. Embora permitisse obter um aspeto da superfície livre do escoamento mais condizente a nível macroscópico com o aspeto do mesmo em modelo físico, os valores do caudal não são satisfatórios. Em alternativa, como demonstrado no ponto 5.3.5, a consideração de um caudal de admissão fixo ao modelo é uma boa solução com vista à obtenção de resultados satisfatórios em termos de caudal descarregado e pressões nos diferentes pontos de medição. Por fim, realizou-se um estudo da influência da zona de aproximação e condições iniciais. Estes modelos, presentes nos pontos 5.3.6 e 5.3.7 permitiram perceber a influência da zona de aproximação no escoamento nos resultados de pressão obtidos, nomeadamente nos dois primeiros pontos de medição. Conclui-se, pela análise dos mesmos, que existe a necessidade de consideração de uma zona de aproximação significativa no modelo 3D do caso de estudo. Através da comparação dos modelos 5.3.6. e 5.3.7. é possível concluir que a consideração de um caudal

fixo de entrada em detrimento de uma altura fixa constitui uma vantagem pois não compromete os valores de pressão obtidos e conduz a resultados mais satisfatórios no que concerne ao caudal descarregado.

Partindo destas considerações existe ainda a necessidade de analisar a sensibilidade do modelo computacional em termos de configuração a três dimensões para o refinamento da malha e tempo de cálculo. Sendo o modelo final em três dimensões e ponderando as dimensões consideráveis do mesmo, existe também a necessidade do estudo da influência de um caudal específico de entrada no modelo em detrimento de um valor fixo para a cota da albufeira.

Para esta análise foi construído um modelo geométrico correspondente à secção de entrada do DCC de Caniçada, como pode ser observado na Figura 44. O modelo computacional tem 75 metros de comprimento (eixo X), 30 metros de largura (eixo Y) e 30 metros de altura (eixo Z), estando a cota do patamar de entrada à altura de 8 metros. O sistema de eixos está localizado para que todas as coordenadas do domínio computacional tenham valor positivo.

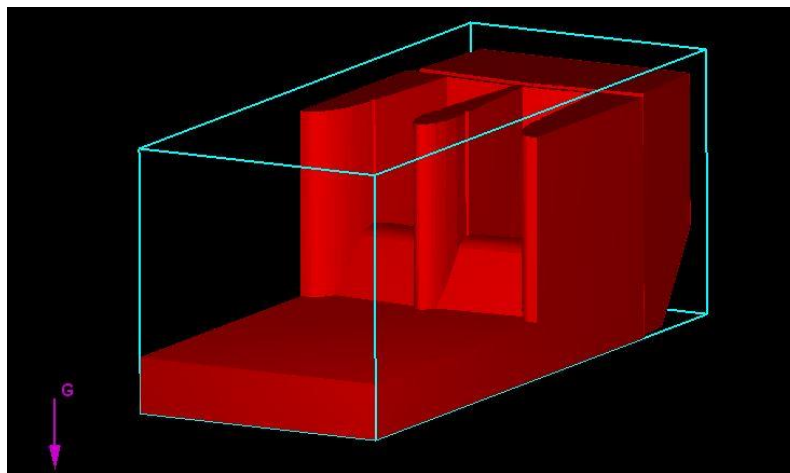


Figura 44 – Modelo de sensibilidade 3D: Configuração geométrica

5.4.1 MODELO COM CONDIÇÃO DE FRONTEIRA PONTO FIXO

5.4.1.1 Condições de ensaio

O primeiro modelo desenvolvido em três dimensões apresenta a configuração geométrica da Figura 44 e pretende servir de modelo base para posterior comparação com diferentes variantes 3D deste modelo de forma a auferir a influência da consideração de uma cota fixa de entrada de fluido de entrada em contraste com um caudal fixo de entrada.

Em termos numéricos o modelo computacional, que contém unidades em Sistema Internacional (SI) e temperatura em graus Celcius, apresenta um tempo total de simulação de 100 segundos, apenas um fluido e escoamento em superfície livre. Em termos físicos, foi considerada a força gravítica, atuante segundo o eixo Z do modelo, com um valor igual a $9,8065 \text{ m/s}^2$; fenómenos de emulsão de ar, com um coeficiente de mistura de 0,5 e um coeficiente de tensão superficial igual a 73 N/m ; e fenómenos de viscosidade e turbulência calculados pelo modelo RNG. O fluido utilizado na presente simulação foi a água, com uma densidade de 1000 kg/m^3 , uma viscosidade constante de $0,001 \text{ m}^2/\text{s}$ e uma compressibilidade de $4.55\text{e-}10 \text{ m}^2/\text{N}$.

As condições de fronteira utilizadas são as seguintes:

- Plano X mínimo: Pressão específica (*Specific Pressure - P*)
- Plano X máximo: Continuidade (*Continuative - C*)

- Plano Y mínimo: Simetria (*Symmetric - S*)
- Plano Y máximo: Simetria (*Symmetric - S*)
- Plano Z mínimo: Continuidade (*Continuative - C*)
- Plano Z máximo: Simetria (*Symetric - S*)

Para condição de entrada (X min) foi considerada uma pressão específica correspondente ao NPA, e igual à cota de 152,5 no DCC, e à cota de 29 metros no modelo computacional atual.

A malha de cálculo utilizada no modelo computacional a três dimensões com condição de fronteira de altura específica é visível na Tabela 20. Como pode ser observado na referida tabela, cada célula de cálculo tem uma dimensão de face de 0,5m.

Tabela 20 – Modelo de sensibilidade 3D: Malha de cálculo

Coordenada - direção X	0	75	Total
Número de células	150		150
Espaçamento da malha	0,5		

Coordenada - direção Y	0	30	Total
Número de células	60		60
Espaçamento da malha	0,5		

Coordenada - direção Z	0	30	Total
Número de células	60		60
Espaçamento da malha	0,5		

A condição inicial utilizada no presente modelo pode ser observada na Figura C2 do Anexo C e compreende uma região de fluido com um comprimento de 30 metros (segundo X) e uma altura à cota de 29 metros (segundo Z) no modelo, correspondente na realidade a um desnível de 21 metros em relação ao patamar de aproximação e 14 metros em relação à crista do descarregador. A altura inicial da região do fluido corresponde ao NPA (152,5) no caso de estudo.

5.4.1.2 Resultados

Para o tempo de simulação final (t=100s) foi obtida a configuração apresentada na Figura 45.

É possível observar que não existe grande instabilidade do escoamento na zona de entrada e que o escoamento apresenta apenas pequenas perturbações a nível de representação gráfica. Esta perturbação poderá estar relacionada com a diminuição da malha de cálculo utilizada pelo que o refinamento da mesma poderá levar a uma melhor representação do mesmo.

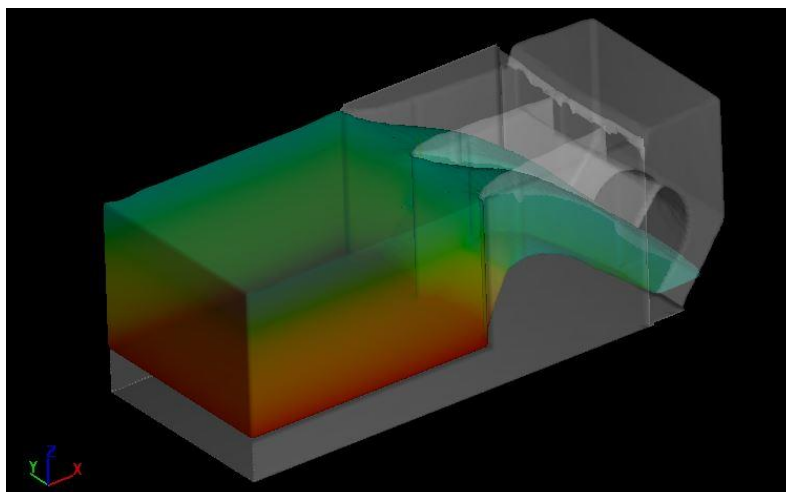


Figura 45 – Modelo de sensibilidade 3D: Configuração final

O caudal descarregado na atual simulação numérica é de 1977 m³/s. Este valor representa um desvio em relação ao modelo físico de 85 m³/s, em termos absolutos – por defeito – e de 4,12 % em termos relativos. Poder-se-á concluir, portanto, que existe uma boa representação do caudal

escoado, sendo o erro de representação inferior a 5%. De referir ainda que no atual modelo, em três dimensões, o fenómeno de oscilação observado nos modelos em duas dimensões tem uma influência muito menor, registando-se no entanto ainda esse fenómeno.

5.4.2. MODELO COM CONDIÇÃO DE FRONTEIRA CAUDAL ESPECÍFICO

5.4.2.1 Condições de ensaio

O modelo computacional caracteriza-se pela utilização de uma condição de fronteira com valor de caudal específico. Pretende-se assim auferir a influência desta condição de fronteira numérica também em modelo 3D. Dado que não é possível simular no modelo computacional toda a zona da albufeira, existe a necessidade de estabelecer uma condição inicial de entrada no modelo. O modelo computacional do caso de estudo terá a necessidade de reduzir essa admissão de fluido a uma das fronteiras, como tal, é necessário auferir se é possível que essa condição possa ser um caudal específico de entrada na fronteira de X min.

O atual modelo contém portanto as mesmas características numéricas e físicas da simulação numérica do ponto anterior (ponto 5.4.1.). As condições iniciais apresentam um enchimento gradual, com o acréscimo de 1 m.c.a. à pressão específica de entrada a cada 2,5 s e a malha de cálculo utilizada a descrita na Tabela 20.

As condições de fronteira utilizadas no atual modelo computacional são também análogas ao modelo do ponto 4.4.1. com exceção para a fronteira de X min, no qual a condição imposta é de um caudal de entrada igual a 2062 m³/s.

5.4.2.2 Resultados

A configuração para o tempo final de simulação é apresentada na Figura 46. Na configuração apresentada é notória a semelhança com a configuração final do modelo do ponto 5.4.1, que pode ser observada na Figura 45. Apenas de salientar uma diferença relacionada com a estabilização inicial do caudal escoado. No presente modelo existe uma maior estabilização do caudal na zona de aproximação, como é visível na secção próxima à fronteira de X mínimo.

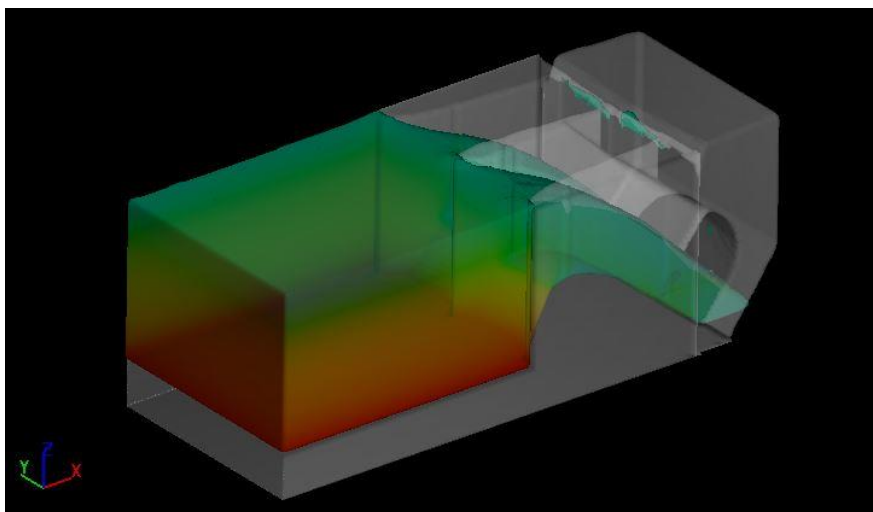


Figura 46 – Modelo de sensibilidade 3D com caudal específico: Configuração final

O caudal escoado na atual simulação numérica é de 2083 m³/s, o que representa um erro absoluto, por excesso, de 21 m³/s, correspondendo este a um erro relativo de 1%.

Tal como no modelo 2D, a utilização do caudal específico na fronteira de entrada tem vantagens a nível dos resultados obtidos para o caudal escoado e também para a maior estabilização do escoamento na zona de aproximação, constituindo-se como a condição de fronteira mais favorável para o estudo do DCC de Caniçada.

5.4.3. MODELO COM MALHA DE CÁLCULO MAIS REFINADA

5.4.3.1 Condições de ensaio

O modelo computacional do ponto 5.3.2 testou a influência da malha de cálculo no tempo total de simulação, bem como na precisão dos resultados obtidos para um modelo a duas dimensões. Após a análise dos resultados dessa simulação foi notório que o refinamento excessivo da malha de cálculo não conduz a uma melhoria significativa da precisão dos resultados e conduz a um incremento significativo do tempo de cálculo (632 %). A influência do incremento do número de células no tempo de cálculo do modelo poderá diferir ao tratar-se de um modelo computacional em três dimensões. Dado que o modelo final a calcular terá dimensões significativas por consequência das grandes dimensões do DCC, há a necessidade de auferir a influência deste parâmetro em modelos mais pequenos para que se possa atingir um bom compromisso entre a dimensão das células de cálculo e o tempo de simulação, sem que se despenda de demasiado tempo de cálculo na obtenção do grau de influência num modelo de dimensões consideráveis.

O modelo realizado é em tudo semelhante ao modelo do ponto 5.4.2 com exceção para as características da malha de cálculo. As características da malha utilizada é visível na Tabela 21.

Tabela 21 – Modelo de sensibilidade 3D com malha refinada: Características da malha

Coordenada - direção X				Total	Coordenada - direção Y				Total	Coordenada - direção Z				Total
	0	30	75	75		0	30	30			0	30	30	
Número de células		60	180	240	Número de células		120	120	Número de células		120		120	
Espaçamento da malha		0,5	0,25		Espaçamento da malha		0,25		Espaçamento da malha		0,25			

É possível observar que a malha de cálculo do atual modelo computacional tem, nas direções Y e Z, metade da dimensão da malha de cálculo utilizada no modelo do ponto 5.4.2. Na direção X a subdivisão do domínio em duas regiões permitiu que a zona de aproximação tivesse uma dimensão de célula igual ao modelo computacional do ponto 5.4.2 e na restante zona uma dimensão de célula correspondente a metade do utilizado na referida simulação anterior. A opção de manter a dimensão de célula nos primeiros 30 metros (zona de aproximação), correspondentes à zona de aproximação justifica-se com o facto de que na referida zona não existem características geométricas complexas nem extração de resultados a efetuar, sendo apenas uma zona de aproximação e estabilização do escoamento.

5.4.3.2 Resultados

A configuração final do escoamento é similar à configuração apresentada na Figura 46 para o modelo enunciado no ponto 5.4.2.

O tempo de cálculo da atual simulação foi de 2 dias, 12 horas, 21 minutos e 36 segundos, o que contrasta com o tempo de simulação de 8 horas, 55 min e 53 segundos para o modelo do ponto 5.4.2, com a malha de cálculo enunciada na Tabela 20. Este valor representa um acréscimo do tempo de simulação em 6,77 vezes. Este acréscimo enorme do tempo de simulação não é comportável para o caso de estudo final que terá dimensões consideráveis. Como tal, é adequado

o uso de uma malha de cálculo com uma dimensão sensivelmente igual à malha de cálculo da Tabela 20.

O caudal descarregado no presente modelo é de 2072 m³/s em contraste com os 2083 m³/s do modelo enunciado no ponto 5.4.2. Este acréscimo de precisão de 0,53 %, quando ponderado com o acréscimo de tempo de cálculo, não se afigura como um ganho substancial para a atual simulação numérica pois o aumento de precisão advindo desse acréscimo do número de células não faz crescer significativamente a precisão dos resultados envolvidos.

5.5 CONSIDERAÇÕES GERAIS DE CALIBRAÇÃO E CONSTRUÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL

Os testes de sensibilidade e calibração permitem estabelecer as condições gerais a considerar no modelo computacional para posterior simulação dos diferentes caudais. São, em seguida apresentadas de forma sucinta os parâmetros numéricos considerados nas simulações numéricas dos diferentes caudais e que resultam da análise dos testes de sensibilidade e calibração. As considerações gerais utilizadas no modelo computacional são descritas de forma mais detalhada no ponto C.3 do Anexo C.

Tendo em consideração os testes anteriormente realizados e as suas conclusões, as simulações dos diferentes caudais no modelo computacional final compreenderá duas fases.

A primeira apresenta um tempo total de simulação de 100 s e contempla uma malha mais refinada que permite a melhor representação das características geométricas. Esta primeira simulação de cada caudal apenas representa a parte física do descarregador, não contendo a parte de jusante, respeitante ao rio Cávado. Esta primeira parte da simulação com a malha mais refinada é realizada com o intuito de serem obtidos os valores de pressão, velocidade, alturas de escoamento e caudais descarregados no modelo computacional. O modelo computacional é de 350x119x83 m, segundo X, Y e Z, respetivamente.

A segunda parte de cada simulação, que tem por objetivo a estimação do alcance do jato, apresenta uma malha menos refinada, contempla na sua configuração o rio Cávado e tem um tempo de simulação de 50 s. Esta segunda parte de cada simulação tem como condição inicial os níveis de água finais da simulação primeira, com $t = 100$ s. O modelo computacional para estudo do alcance do jato tem dimensões de 520x119x83 m. A simulação deverá então conter portanto superfície livre, um só fluido, a água, e unidades em sistema internacional e temperatura em graus Celcius.

Pelos ensaios de calibração depreende-se que as grandezas físicas a considerar no modelo computacional deverão ser: força gravítica, emulsão de ar e viscosidade e turbulência. A força gravítica tem valor de 9,86065 m/s² e atua no sentido negativo do eixo Z. O cálculo do emulsão de ar é considerado com um coeficiente de mistura de 0,5 e uma tensão superficial de 73 N/m. O modelo de turbulência mais adequado e a utilizar para fenómenos de viscosidade e turbulência é o modelo RNG.

A construção geométrica foi efetuada como descrito no Anexo D.1 e foi realizada a integração no *software* Flow 3D através do formato “.stl”.

Como descrito anteriormente, foram utilizadas duas malhas de cálculo distintas para cálculo das grandezas no descarregador e o alcance do jato, respetivamente. As características da malha utilizada na primeira fase de cada simulação numérica, com $t=100$ s, é apresentada na Tabela 22. Esta primeira malha de cálculo é mais refinada e pretende garantir maior precisão no escoamento para obtenção dos valores de pressão, velocidade, alturas de escoamento e caudais descarregados.

Tabela 22 – Modelo computacional: Malha de cálculo (1ª parte de cada simulação)

											Total
Coordenada - direção X	0	20	40	60	140	160	280	300	320	350	350
Número de células	20	25	33	160	33	171	33	40	50		565
Espaçamento da malha	1,00	0,80	0,61	0,50	0,61	0,70	0,61	0,50	0,60		

								Total
Coordenada - direção Y	0	20	60	70	80	119		119
Número de células		33	80	17	13	39		182
Espaçamento da malha		0,61	0,50	0,59	0,77	1,00		

								Total
Coordenada - direção Z	20	30	40	70	81	82,9		62,9
Número de células		20	17	60	16	3		116
Espaçamento da malha		0,50	0,59	0,50	0,69	0,63		

Na Tabela 23 é apresentada a malha de cálculo utilizada na segunda fase de cada simulação e que pretende estimar o alcance do jato. Esta malha, como referido, apresenta um maior espaçamento e consequentemente menor precisão. No entanto, essa menor precisão não afeta a obtenção do alcance do jato, dado que a precisão para a obtenção desta grandeza pode ser menor.

Tabela 23 – Modelo computacional: Malha de cálculo para determinação do alcance do jato

													Total
Coordenada - direção X	0	20	40	60	140	160	280	300	320	350	520		520
Número de células		20	25	30	150	30	150	40	30	50	170		695
Espaçamento da malha		1,00	0,80	0,67	0,53	0,67	0,80	0,50	0,67	0,60	1,00		

								Total
Coordenada - direção Y	0	20	60	70	80	119		119
Número de células		30	60	15	10	40		155
Espaçamento da malha		0,67	0,67	0,67	1,00	0,98		

								Total
Coordenada - direção Z	0	20	30	40	70	82,9		82,9
Número de células		20	15	15	50	20		120
Espaçamento da malha		1,00	0,67	0,67	0,60	0,65		

As condições de fronteira utilizadas no cálculo do modelo computacional são as seguintes:

- Plano de X mínimo: - Caudal Específico (*Volume flow rate – Q*) para $Q = 2062 \text{ m}^3/\text{s}$
- Ponto fixo de entrada (*Specific Pressure – P*) para os restantes caudais simulados ($Q = 896, 690, 527 \text{ e } 303 \text{ m}^3/\text{s}$)
- Plano de X máximo: Escoamento (*Outflow – O*)
- Plano de Y mínimo: Continuidade (*Continuative – C*)
- Plano de Y máximo: Simetria (*Symmetry – S*)
- Plano de Z mínimo: Parede (*Wall– W*)
- Plano de Z máximo: Escoamento (*Outflow – O*)

Para o plano de X min, entrada do modelo computacional, de acordo com os resultados obtidos nos ensaios preliminares anteriormente realizados foi adotado o caudal específico para o caudal de projeto, com a cota de montante igual ao NPA (152,5). Nos restantes caudais dado que existe

um fecho parcial da comporta foi utilizada uma pressão específica de entrada de valor igual ao NPA, pois a condição de fronteira correspondente à definição de caudal específico de entrada era incompatível com a necessidade de manter a cota de montante e o caudal descarregado constantes. Após a simulação foram comparados os caudais descarregados para as simulações física e numérica.

Para a o plano de X máx, zona de descarga, foi utilizada a fronteira escoamento que garante uma zona de pressão 0 na referida fronteira. Esta condição não afeta o escoamento no interior do domínio computacional e permite a obtenção do caudal escoado na referida fronteira. As restantes condições de fronteira foram definidas para que não afetassem o escoamento no interior do domínio computacional.

Como condições iniciais foram definidas duas regiões de fluido. A primeira, representativa do nível de água a montante, tem cota igual ao NPA e é representada até à secção de entrada do descarregador. A segunda é respeitante ao nível de jusante do rio Cávado e é definida de acordo com a curva de vazão do rio. Na segunda parte de cada simulação, para alcance do jato, a condição de fronteira imposta, como referido, é a configuração final do escoamento para $t=100s$.

De acordo com a calibração efetuada ao longo do capítulo 5 da presente dissertação, verificou-se a vantagem do cálculo de equações de movimento através de equações de 2ª ordem, sendo este o opção numérica tomada. Para o cálculo de convergência numérica foi adotado o modelo GMRES (*generalized minimal residual method*), que dada a grande dimensão e complexidade da estrutura do DCC, é o método de cálculo de convergência mais indicado.

6

Resultados e Discussão

No capítulo sexto da presente dissertação são apresentados, para cada grandeza estudada, os resultados do modelo computacional para as diferentes simulações numéricas e, em seguida, apresentada a análise comparativa entre os resultados computacionais e os obtidos em modelo físico. O capítulo encontra-se dividido em 5 subcapítulos respeitantes às 5 diferentes grandezas a comparar: caudais descarregados; alturas de escoamento; pressões; alcance do jato e velocidades.

6.1 CAUDAIS DESCARREGADOS

Dado que a condição de fronteira especificada no modelo computacional diz respeito a um controlo da adução de água ao sistema através do controlo da pressão na zona de entrada, existe a necessidade de aferir a validade dos valores de caudal descarregados. É então realizado, para as diferentes simulações numéricas correspondentes aos diferentes caudais em estudo, uma análise comparativa do caudal descarregado. Em todas as simulações numéricas realizadas foi verificada a existência de uma oscilação ou flutuação do caudal descarregado na secção de saída (fronteira X max), conforme já referido no capítulo 5. No presente estudo são apresentados os valores respeitantes ao tempo de final de simulação, $t = 100$ s.

Na Tabela 24 são apresentados os valores dos caudais descarregados obtidos em modelo computacional, bem como a comparação para os dois modelos nos diferentes caudais.

Tabela 24 – Comparação entre os caudais dos modelos físico e computacional

	Modelo físico (m ³ /s)	Modelo computacional (m ³ /s)	Variação absoluta (m ³ /s)	Variação relativa (%)
Q projeto	2062	2052,2	-9,8	-0,475
Q1	896	845,4	-50,6	-5,647
Q2	690	727,3	37,3	5,406
Q3	527	551,7	24,7	4,678
Q4	303	291,8	-11,2	-3,685

Dos resultados obtidos para o caudal descarregado no modelo computacional é de salientar o erro quase nulo nos resultados obtidos por simulação numérica respeitante ao caudal de projeto. Este erro é inferior a 1%, por defeito, e corresponde a um desvio absoluto de $9,8 \text{ m}^3/\text{s}$.

No modelo computacional para o caudal de $896 \text{ m}^3/\text{s}$, verifica-se uma boa concordância nos resultados obtidos pelos dois modelos. Na referida simulação o modelo computacional subestima também o caudal descarregado em modelo físico. Para o caudal de $690 \text{ m}^3/\text{s}$ a diferença no caudal descarregado entre os dois modelos corresponde a cerca de 5%. Existindo, portanto, uma boa aproximação entre os resultados do modelo computacional e o modelo físico. A diferença absoluta entre o caudal descarregado em modelo físico e computacional, para o caudal de $527 \text{ m}^3/\text{s}$, corresponde a cerca de $25 \text{ m}^3/\text{s}$. Este valor representa um erro relativo inferior a 5%. A aproximação entre os resultados do modelo computacional e físico é portanto bem satisfatória. Por fim, para o caudal de $303 \text{ m}^3/\text{s}$ é de salientar o mais baixo erro de aproximação, menor que 4%.

6.2 ALTURAS DE ESCOAMENTO

A comparação das alturas de escoamento em diferentes secções para os diferentes caudais estudados permite aferir a capacidade do modelo numérico em simular corretamente o escoamento e o aspeto da superfície livre do escoamento. Conforme já referido, não foi possível a recolha, em modelo físico, dos perfis de altura do escoamento para o caudal de projeto, $Q = 2062 \text{ m}^3/\text{s}$, como referido no capítulo 4. Como tal, apenas foi realizada a comparação do andamento da superfície livre do escoamento para os caudais de 896 , 690 , 527 e $303 \text{ m}^3/\text{s}$. Seguidamente são apresentados os valores numéricos obtidos para os diferentes caudais em estudo nas 10 secções de medição representadas na Figura 9.

O aspeto da superfície livre do escoamento extraído para a simulação numérica de caudal igual a $896 \text{ m}^3/\text{s}$ é visível a cor vermelha entre a Figura 47 e a Figura 51 (com vista de montante para jusante). As referidas figuras são representativas de um corte vertical segundo o plano YZ na secção de medição. As representações foram obtidas através das representações 2D extraídas do *software* Flow 3D e que se encontram representadas entre as Figuras D11 e D20 do Anexo D.

Da análise das configurações da superfície livre do escoamento obtidas para o caudal de $896 \text{ m}^3/\text{s}$ é evidente a simetria, em termos gerais entre os dois vãos do DCC, em relação ao septo central, com exceção para as secções da estrutura final.

O aspeto da superfície livre do escoamento para o caudal de $690 \text{ m}^3/\text{s}$ nas diferentes secções de medição é visível entre a Figura 47 e a Figura 51, a cor azul. Estas resultam das representações 2D presentes entre as Figuras D21 a D30 do ponto D.2.2 do Anexo D. Para o caudal de $690 \text{ m}^3/\text{s}$ verifica-se também, com exceção das secções 9 e 10, a simetria do aspeto da superfície livre do escoamento nos dois vãos em relação ao septo central. As alturas de escoamento apresentam de modo geral uma altura de escoamento inferior à observável no caudal de $896 \text{ m}^3/\text{s}$.

As Figuras D31 a D40 presentes no ponto D.2.3 do Anexo D correspondem à configuração 2D, obtida numericamente para o caudal de $527 \text{ m}^3/\text{s}$, sendo a respetiva representação gráfica observável a cor amarela entre a Figura 47 e a Figura 51. À semelhança dos casos anteriores, existe uma simetria do aspeto da superfície livre com exceção das secções 9 e 10 e, modo geral, as configurações apresentam uma altura de lâmina de água inferior aos ensaios anteriores.

Para o caudal de $303 \text{ m}^3/\text{s}$ são apresentadas as alturas do escoamento para as diferentes secções de medição a cor verde entre a Figura 47 e a Figura 51. Essa representação gráfica advém das imagens presentes entre as Figuras D41 a D50 do ponto D.2.4 do Anexo D. Tal como verificado nos casos anteriores, para o caudal de $303 \text{ m}^3/\text{s}$, a simetria do aspeto da superfície livre do

escoamento nos dois vãos em relação ao septo central prevalece entre as secções de medição 1 a 8. Na secção 9 existe uma configuração semelhante em ambos os vãos e que é idêntica à da secção de medição número 10. O aspeto da superfície livre do escoamento para o caudal de 303 m³/s continuam a apresentar, de um modo geral, valores inferiores aos obtidos para os restantes caudais, como espectável.

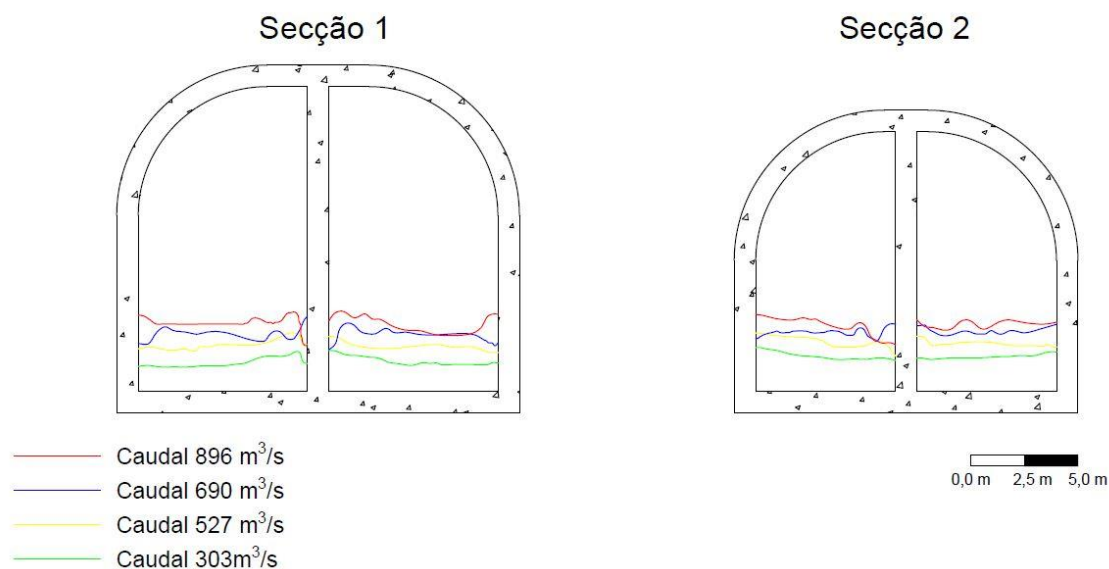


Figura 47 – Alturas de escoamento no modelo computacional nos diferentes caudais nas secções 1 e 2

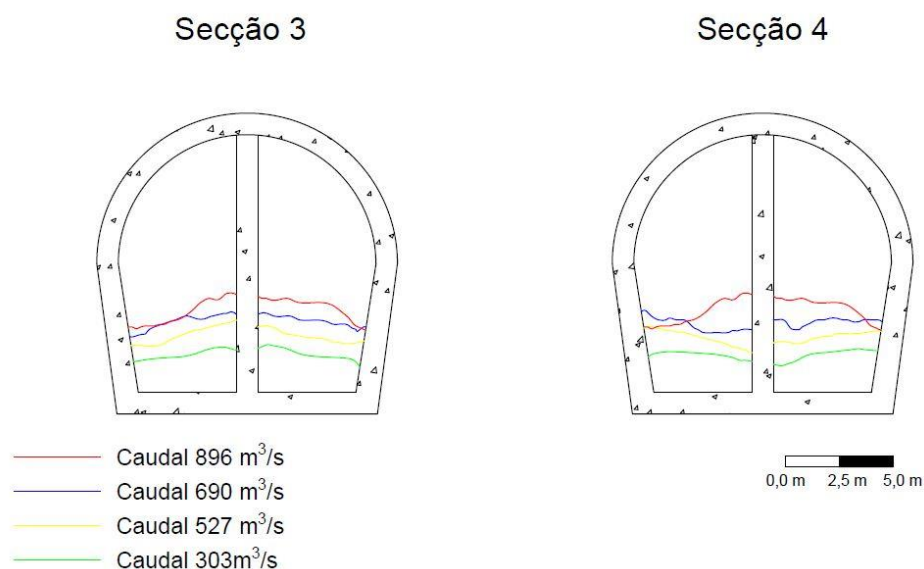


Figura 48 – Alturas de escoamento no modelo computacional nos diferentes caudais nas secções 3 e 4

Secção 5

Secção 6

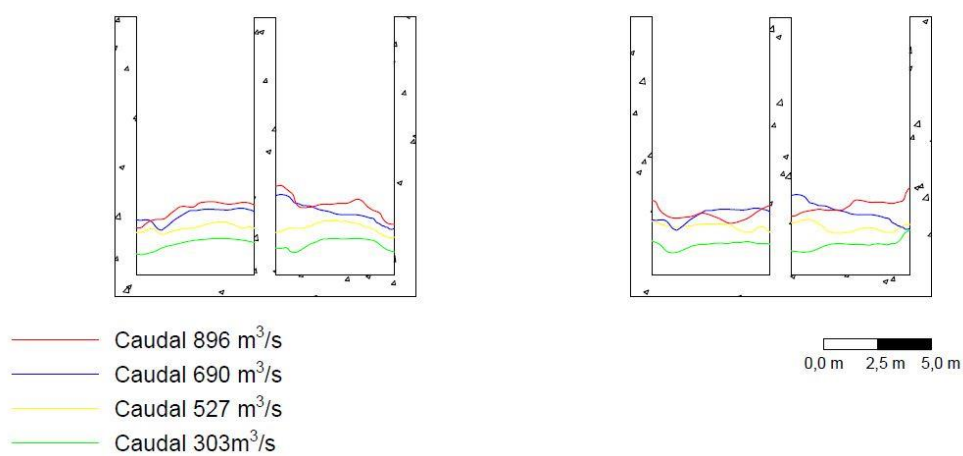


Figura 49 – Alturas de escoamento no modelo computacional nos diferentes caudais nas secções 5 e 6

Secção 7

Secção 8

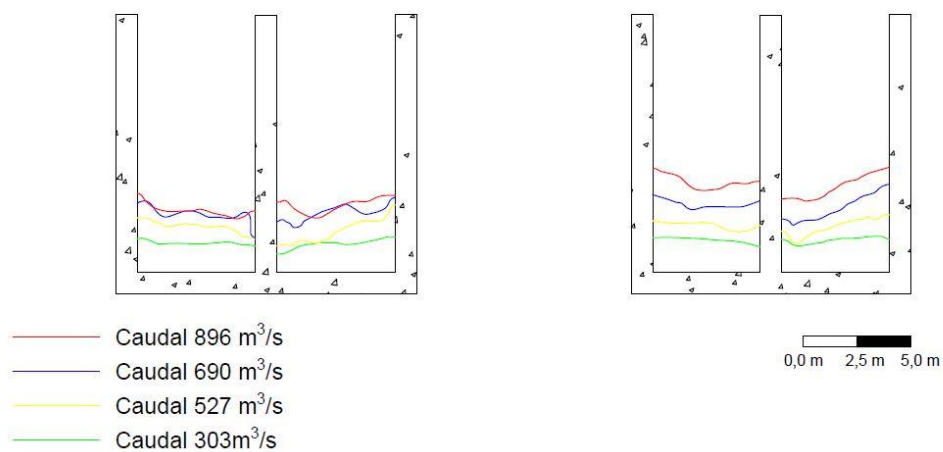


Figura 50 – Alturas de escoamento no modelo computacional nos diferentes caudais nas secções 7 e 8

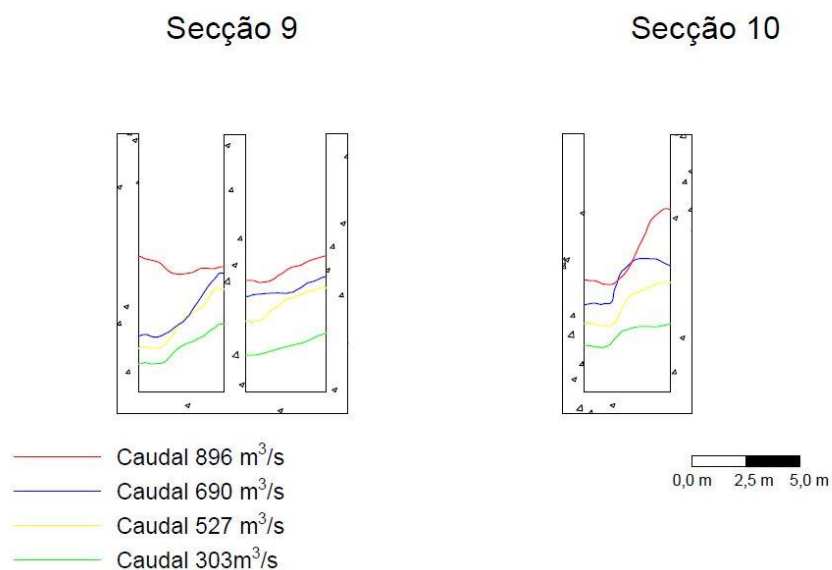


Figura 51 – Alturas de escoamento no modelo computacional nos diferentes caudais nas secções 9 e 10

6.2.1 COMPARAÇÃO DAS ALTURAS DE ESCOAMENTO PARA O CAUDAL DE 896 M³/S

Verifica-se que a concordância é globalmente bastante razoável, especial e nomeadamente entre os perfis 1 e 8, inclusive. O ajuste é mesmo excelente para os perfis 1,2 e 8, sendo que nas secções intermédias o modelo computacional genericamente capta (com exceção da vão direito, nas secções 4 e 7) a aparente simetria do escoamento nos dois vãos relativamente ao septo central e o aspeto da superfície livre do escoamento. As principais diferenças no andamento da superfície livre concentram-se na zona curva terminal do DCC (secções 9 e 10), nomeadamente no vão direito da secção 9. A comparação do aspeto da superfície livre para os modelos físico e computacional é observável entre a Figura 52 e a Figura 56.

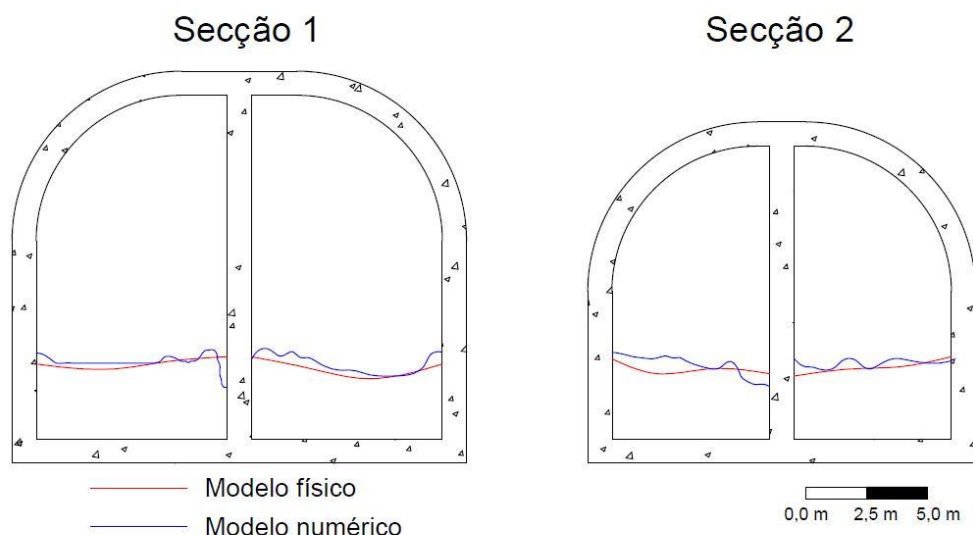


Figura 52 – Comparação entre os resultados do modelo físico e computacional: alturas de escoamento para o caudal de 896 m³/s nas secções 1 e 2

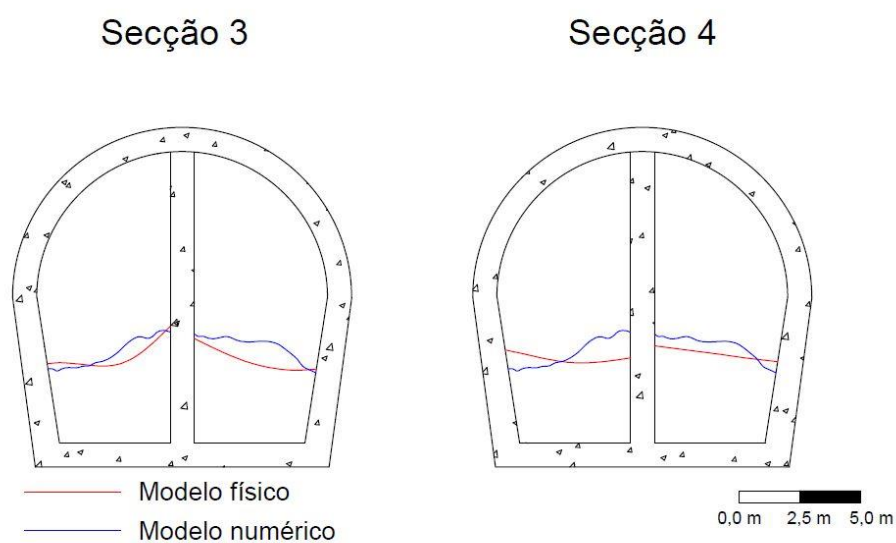


Figura 53 – Comparação entre os resultados do modelo físico e computacional: alturas de escoamento para o caudal de $896 \text{ m}^3/\text{s}$ nas secções 3 e 4

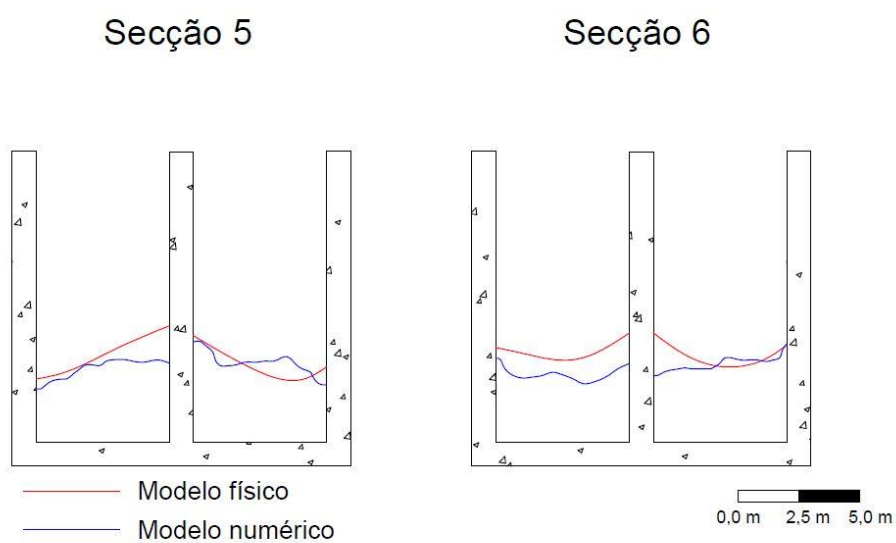


Figura 54 – Comparação entre os resultados do modelo físico e computacional: alturas de escoamento para o caudal de $896 \text{ m}^3/\text{s}$ nas secções 5 e 6

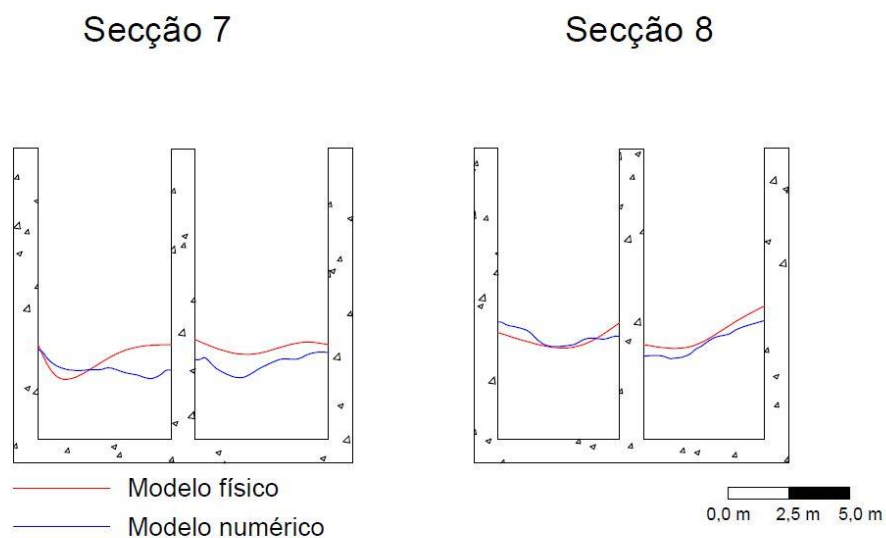


Figura 55 – Comparação entre os resultados do modelo físico e computacional: alturas de escoamento para o caudal de $896 \text{ m}^3/\text{s}$ nas secções 7 e 8

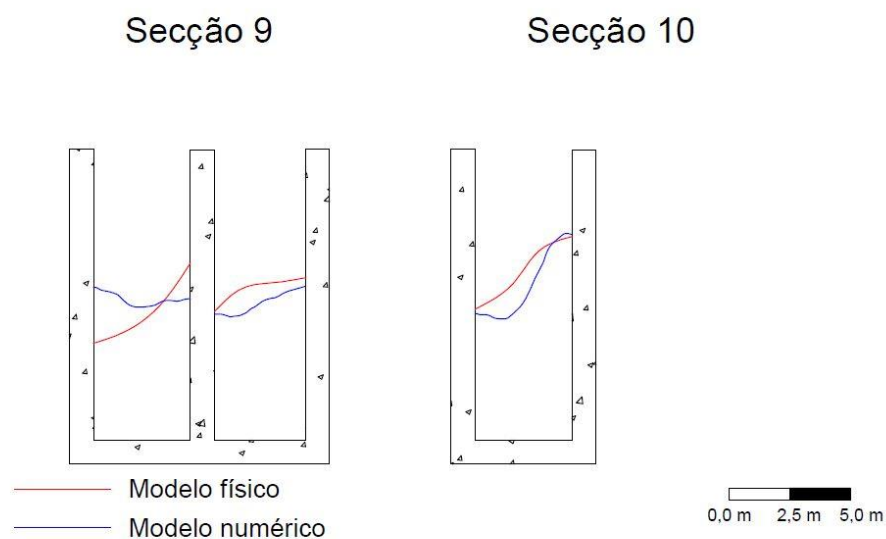


Figura 56 – Comparação entre os resultados do modelo físico e computacional: alturas de escoamento para o caudal de $896 \text{ m}^3/\text{s}$ nas secções 9 e 10

Há a registar, de acordo com os resultados obtidos, a capacidade de representação de pormenor no modelo computacional. Este maior pormenor com o facto de que no modelo computacional é possível retirar informação acerca das alturas de escoamento no número quase infinito de pontos o que se revela, em modelo físico, uma tarefa quase impossível dado que é um processo moroso.

6.2.2 COMPARAÇÃO DAS ALTURAS DE ESCOAMENTO PARA O CAUDAL DE 690 M³/S

A comparação entre as configurações da superfície livre do escoamento obtidas para as simulações física e numérica para o caudal de 690 m³/s podem ser observadas no Anexo E (Figuras E1 a E5, do ponto E.1).

Modo geral verifica-se uma concordância razoável dos resultados em modelo físico e computacional para as diferentes configurações da superfície livre do escoamento. O aspeto da superfície livre do escoamento nas diferentes secções de controlo apresenta também uma concordância razoável em termos de inflexões das curvas correspondentes à posição da superfície livre do escoamento. A menor concordância foi verificada para as secções de medição 1, 3 e 10. Em oposição, verifica-se uma excelente concordância do andamento da superfície livre do escoamento para as secções de medição 5, 7 e 8.

6.2.3 COMPARAÇÃO DAS ALTURAS DE ESCOAMENTO PARA O CAUDAL DE 527 M³/S

No ponto E.1 do Anexo E, entre as Figuras E6 e E10, é apresentada a comparação gráfica entre as configurações do escoamento no DCC de Caniçada nos modelos físico e computacional para o caudal de 527 m³/s.

Verifica-se que a concordância é de modo geral bastante razoável com exceção para as da estrutura final. O ajuste é mesmo excelente para os perfis 3, 6 e 9, sendo que nas secções intermédias o modelo computacional genericamente capta o escoamento obtido em modelo físico existindo no entanto algumas diferenças pontuais. As principais diferenças no aspeto da superfície livre registam-se para as secções de medição 1, 5 e 8.

6.2.4 COMPARAÇÃO DAS ALTURAS DE ESCOAMENTO PARA O CAUDAL DE 303 M³/S

Nas Figuras E31 a E40 do ponto E.1 do Anexo E, é possível observar a comparação das alturas de escoamento obtidas no modelo físico e computacional para o caudal de 303 m³/s. Da análise dos resultados obtidos há a denotar a proximidade dos valores obtidos para ambas as simulações. No entanto, e ao contrário do verificado nas simulações anteriores, os pontos notáveis da linha representante das alturas de escoamento não apresenta uma correspondência tão notória para os dois modelos. Das diferentes secções de controlo, as que apresentam maior semelhança entre os resultados obtidos por ambos os modelos são as secções 6, 7 e 10 (Figuras E36, E37 e E40).

Em antítese, os locais onde se registam as maiores diferenças em termos de aspeto da superfície livre do escoamento para o escoamento dizem respeito às secções 2, 5 e 9 (Figuras E32, E35 e E39).

6.3 PRESSÕES

Conforme já referido, foram realizadas medições de pressão no modelo físico, através de piezómetros distribuídos ao longo do fundo e das paredes laterais do DCC.

Os correspondentes valores obtidos por modelação computacional para a pressão nos pontos de medida de alturas piezométricas no fundo do descarregador são apresentados na Tabela 25.

Para a obtenção dos valores de pressão nos diferentes pontos foi utilizado o *Neutral file*, modo de extração já anteriormente descrito e utilizado no capítulo 5.

Por sua vez, na Tabela 26 são apresentados os valores de pressão obtidos em modelo computacional para as tomadas de pressão laterais em modelo físico, de acordo com a Figura 9.

Tabela 25 – Valores de pressão em modelo computacional para os pontos de medição no fundo do DCC

Tomada nº	Distância em Perfil	Cota de medição	Pressão (m.c.a.)				
			Qproj	Q1	Q2	Q3	Q4
1	74,15	66,60	2,59	9,50	11,09	12,64	14,43
2	76,19	67,00	0,78	5,95	7,72	10,19	13,36
3	78,74	66,64	0,57	1,56	1,51	3,65	7,08
4	84,19	64,13	1,32	-0,27	-0,47	-0,51	-0,27
5	89,15	60,42	4,36	1,68	1,36	1,01	0,62
6	94,17	56,57	5,90	1,94	1,54	1,11	0,49
7	105,37	48,92	11,29	5,04	4,32	3,31	1,51
8	123,35	43,51	13,23	6,73	5,99	4,85	3,03
9	158,45	39,89	7,96	3,55	3,17	2,56	1,69
10	184,97	37,16	7,73	3,60	2,89	2,48	1,65
11	213,03	34,21	7,52	3,45	2,85	2,42	1,68
12	300,10	25,30	7,42	2,91	2,65	2,14	1,28
13	318,08	23,45	16,39	6,06	4,54	3,59	1,75
14	325,51	23,27	17,78	7,09	5,59	3,78	2,10
15	332,65	24,08	17,91	9,29	7,47	5,52	3,04
16	338,79	25,26	12,85	7,91	7,34	5,37	3,60

Tabela 26 – Valores de pressão em modelo computacional para os pontos de medição laterais do DCC

Tomada nº	Distância em Perfil	Cota de medição	Pressão (m.c.a.)				
			Qproj	Q1	Q2	Q3	Q4
1D	0,00	24,94	15,59	4,74	2,60	1,15	0,00
1E	318,08	24,94	13,24	3,15	2,11	1,31	0,11
2D	318,08	28,41	8,32	-	-	-	-
2E	318,08	28,41	5,84	-	-	-	-
3D	318,08	24,56	15,89	5,11	4,09	2,59	1,58
3E	325,51	24,56	14,94	4,08	2,32	1,11	0,22
4D	325,51	28,03	9,69	-	-	-	-
4E	325,51	28,03	6,98	-	-	-	-
5D	325,51	25,27	16,70	7,32	4,97	3,99	2,44
5E	332,65	25,27	11,81	3,48	2,18	1,25	0,37
6D	332,65	28,74	8,95	0,93	0,48	0,40	-
6E	332,65	28,74	4,17	-	-	-	-
7D	332,65	31,78	3,57	-	-	-	-
7E	332,65	31,78	-0,44	-	-	-	-
8D	332,65	26,75	9,71	5,75	4,74	2,33	2,11
8E	338,79	26,75	9,55	4,44	3,45	2,22	0,81
9D	338,79	30,22	5,31	1,93	0,67	-0,16	-
9E	338,79	30,22	3,39	-	-	-	-
10D	338,79	33,26	2,71	1,17	-	-	-
10E	338,79	33,26	0,69	-	-	-	-

Das pressões obtidas para o caudal de $2062 \text{ m}^3/\text{s}$, caudal de projeto, é de salientar a não existência de pressões negativas no fundo do DCC de Caniçada, que poderão ter implicações na conservação na própria estrutura do descarregador. É de salientar também a existência de pressão quase nula (mesmo negativa) na tomada de pressão 7E, na parede lateral esquerda do vão esquerdo. Esta tomada de pressão encontra-se na parte final do descarregador, em zona curva, em planta, do DCC. A configuração da parte terminal do DCC de Caniçada, com uma curva em planta (Figura A.1), poderá não só justificar a existência do referido valor negativo na tomada de pressão 7E, como também do valor próximo de zero, registado na tomada de pressão 10E. Consequência dessa configuração da estrutura final do descarregador é também a existência de valores de pressão mais baixos para as tomadas de pressão situadas na parede esquerda do DCC.

Dos valores obtidos numericamente para a pressão nos diferentes pontos de medição, para o caudal de $896 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q1 das Tabelas 28 e 29), há que destacar a existência de uma pressão negativa no fundo do descarregador. Esta pressão negativa corresponde à tomada de pressão número 4 em modelo físico, na zona de entrada do DCC.

Relativamente às pressões nas paredes laterais, será de salientar desde logo, a não obtenção de valores de pressão para os pontos de medição 2D, 2E, 4D, 4E, 6E, 7D, 7E, 9E e 10E, pelo facto de o escoamento não atingir a cota das tomadas de pressão. O facto de a grande maioria desses valores reportar maioritariamente à parede esquerda do DCC tem que ver com a configuração do mesmo em planta, fruto da existência da curva em planta para a secção final aumentando a carga e a altura de escoamento na face direita do descarregador.

De destacar a existência de um valor elevado de pressão para a tomada de pressão número 1. Esta evidência é fruto da existência da comporta que provoca uma altura de lâmina de água superior a montante da referida comporta e consequentemente aumenta a carga na referida tomada de pressão.

Nos resultados correspondentes à pressão para o caudal de $690 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q2, nas tabelas 28 e 29), há que destacar a existência de um valor de pressão negativo no fundo do descarregador. Este ponto, correspondente à tomada de pressão 4 em modelo físico, já havia apresentado um valor negativo no ensaio correspondente ao caudal de $896 \text{ m}^3/\text{s}$. De destacar, e à semelhança do verificado no ensaio anterior, a existência de um valor elevado de pressão para o ponto de medição número 1.

No que respeita aos valores de pressão nas tomadas laterais DCC, não foi possível a medição de valores de pressão para os pontos 2D, 2E, 4D, 4E, 6E, 6D, 7E, 9E, 10D e 10E. Esta não obtenção de resultados é devida ao facto de o escoamento não atingir a cota de medição nos referidos pontos, à semelhança do ensaio anterior. Ainda em comparação com o ensaio anterior de referir a não obtenção de resultados de pressão para o ponto 10D, que havia registado pressão na simulação correspondente ao caudal de $890 \text{ m}^3/\text{s}$.

Dos resultados obtidos para o caudal de $527 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q3, nas tabelas 28 e 29) há a destacar, à semelhança dos outros modelos numéricos com comporta, a existência de um valor de pressão negativo no ponto de medição número 4. Em congruência com os resultados anteriores está também a existência de valores elevados de pressão nas tomadas de pressão 1 e 2. Seguindo a tendência existente com a modelação dos caudais 896 e $690 \text{ m}^3/\text{s}$, os valores de pressão obtidos no ponto de medição número 1 e 2 são superiores aos anteriormente obtidos para o caudal de $690 \text{ m}^3/\text{s}$. O aumento da pressão medida para estes pontos em relação aos obtidos nas simulações anteriores poderá estar relacionada com o aumento da carga e diminuição da velocidade existente na parte inicial do DCC, consequência do maior fecho da comporta.

Em relação aos pontos de medição correspondentes às tomadas de pressão no muros laterais do vão esquerdo do descarregador, há a referir o facto de o escoamento não atingir a cota dos pontos de medição número 2D, 2E, 4D, 4E, 6E, 7D, 7E, 9E, 10D e 10E. Os pontos onde não foi possível obter valores de pressão são, portanto, os mesmos da simulação numérica para o caudal de

690 m³/s. Verifica-se ainda para a existência de uma valor de pressão negativa no muro lateral esquerdo do vão esquerdo, no ponto de medição 9E.

A simulação numérica para o caudal de 303 m³/s (Q4, nas tabelas 28 e 29) vem confirmar a tendência verificada nas simulações anteriores. Assim, também neste caso se verifica a existência de uma pressão negativa no ponto de medição correspondente à tomada de pressão número 4 e a existência de valores elevados de pressão nas tomadas de pressão número 1 e 2. Os valores de pressão nos pontos de medição 1 e 2 são superiores aos registados nas simulações anteriores.

No que concerne aos valores de pressão nas laterais do DCC, há a registar a impossibilidade de medição de pressões nos pontos de medição 2D, 2E, 4D, 4E, 6D, 6E, 7D, 7E, 9D, 9E, 10D e 10E. Existe portanto um aumento do número de pontos de medição nos quais o escoamento não atinge a cota do mesmo. De salientar também os valores próximos de 0 para os pontos de medição 1E e 3E e o valor nulo para a pressão no ponto de medição correspondente à tomada de pressão 1D. Para o ponto 1D, o valor de pressão fornecido pelo modelo computacional é nula, no entanto este indício não é sinal da não existência de escoamento no referido ponto de medição, dado que se verifica a existência de velocidade do fluido segundo X, sinal de que existe escoamento na cota referente ao ponto de medição em questão.

É apresentada seguidamente uma comparação dos valores de pressão na soleira de fundo do DCC para ambos os modelos, físico e computacional.

6.3.1 PRESSÕES PARA O CAUDAL DE PROJETO, Q = 2062 m³/S

Na Figura 57 é possível observar a dispersão entre os valores de pressão obtidos para o modelo numérico e os medidos no modelo físico. A comparação numérica dos valores de pressão entre os dois modelos (i.e., relativos aos modelos físico e numérico) é apresentada na Tabela E1 do Anexo E.

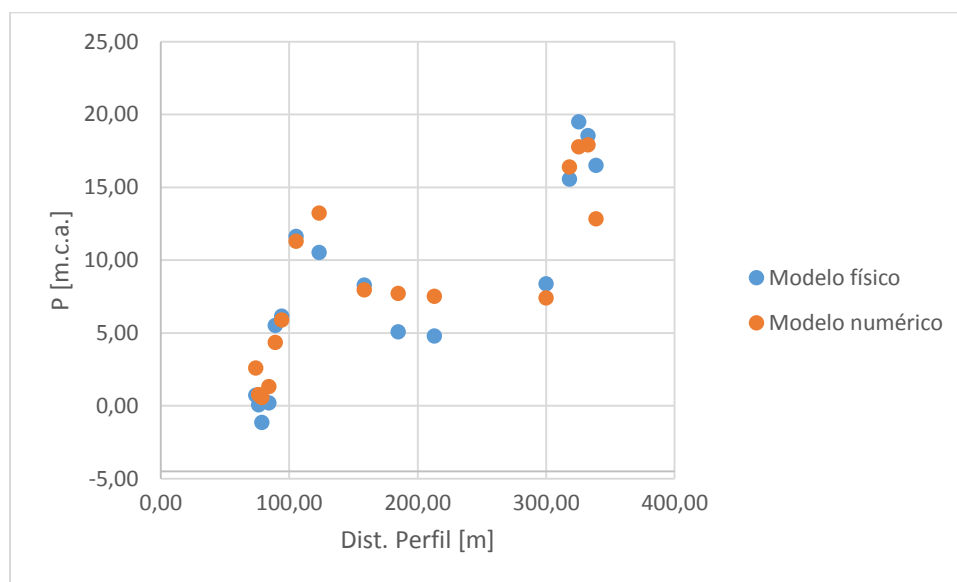


Figura 57 – Comparação entre os valores de pressão na soleira do DCC obtidos através dos modelos físico e computacional para Q = 2062 m³/s

De salientar nos resultados obtidos a boa concordância em termos gerais entre os valores de pressão resultantes da simulação numérica e da modelação física. A maior discrepância entre os dois modelos é respeitante às tomadas de pressão 10 e 11, de acordo com a designação da Figura 9, e que serão consequência das pequenas oscilações que se verificam ao longo do DCC.

6.3.2 PRESSÕES PARA O CAUDAL DE 896 M³/S

A comparação entre os valores de pressão para o caudal de 896 m³/s e para as tomadas do fundo do DCC é visível na Figura 58. A correspondente Tabela comparativa é visível na Tabela E 2 do Anexo E. Mau grado com uma aparente maior dispersão, o diferencial entre os correspondentes valores dos modelos físico e computacional, apresentam globalmente boa concordância, exceção feita apenas para os valores correspondentes às tomadas de pressão 8, 10 e 11.

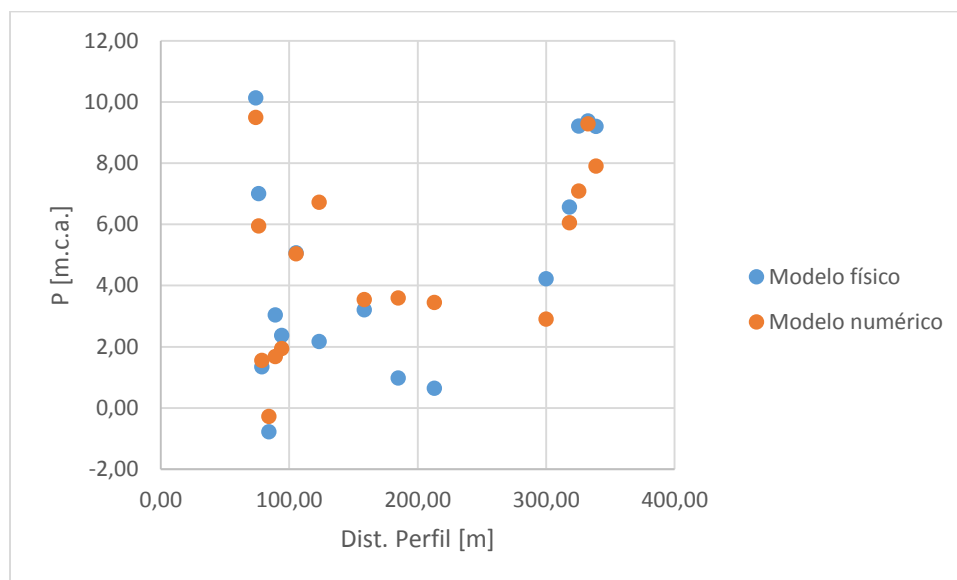


Figura 58 – Comparação entre os valores de pressão na soleira do DCC obtidos através dos modelos físico e computacional para $Q = 896 \text{ m}^3/\text{s}$

6.3.3 PRESSÕES PARA O CAUDAL DE 690 M³/S

É visível na Figura 59 a comparação gráfica dos valores de pressão obtidos para o caudal de 690 m³/s, contendo a Tabela E 3 do Anexo E os valores obtidos na simulação numérica.

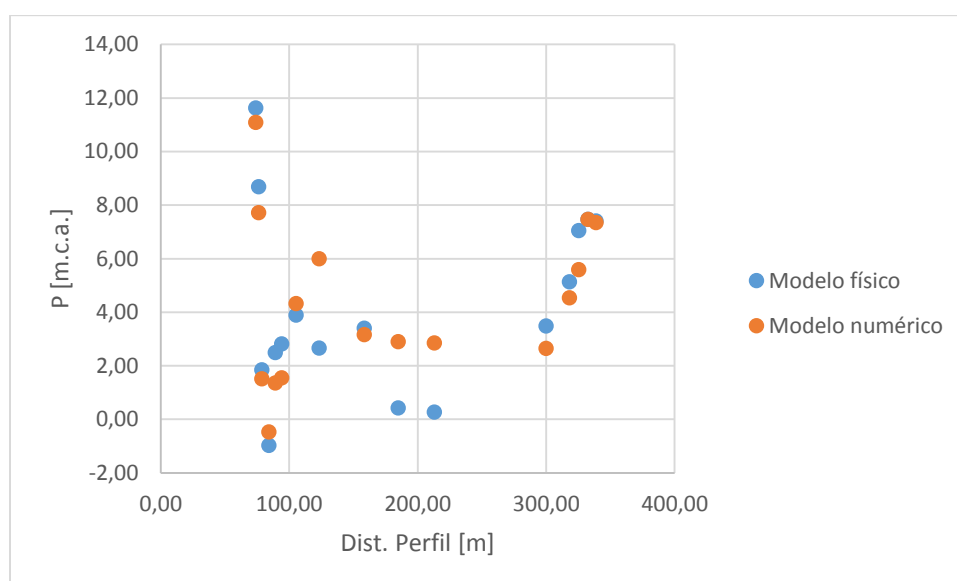


Figura 59 – Comparação entre os valores de pressão na soleira do DCC obtidos através dos modelos físico e computacional para $Q = 690 \text{ m}^3/\text{s}$

Na generalidade, os resultados obtidos na simulação numérica correspondente ao caudal de $690 \text{ m}^3/\text{s}$ demonstram uma boa concordância entre o modelo físico e computacional, principal e nomeadamente nos pontos da secção final do descarregador.

À semelhança do caso anterior, a maior diferença entre os valores de pressão diz respeito aos valores obtidos na posição das tomadas de pressão 10 e 11 e que deverá ser consequência, como nos casos anteriores de pequenas oscilações do escoamento ao longo da secção regular do descarregador. Essas pequenas oscilações são perceptíveis nas diferenças de configuração da superfície do escoamento entre secções consecuentes.

6.3.4 PRESSÕES PARA O CAUDAL DE $527 \text{ m}^3/\text{s}$

Na Figura 60 é possível observar a comparação gráfica dos resultados de pressão no fundo do vão esquerdo do DCC obtidos pelos modelos físico e computacional.

Da análise dos resultados obtidos é possível afirmar que, em termos gerais, existe uma concordância entre os valores de pressão obtidos pelos dois modelos, numérico e físico. Tal como nas simulações descritas anteriormente, persiste a maior discrepância entre os dois modelos para as tomadas de pressão 10 e 11.

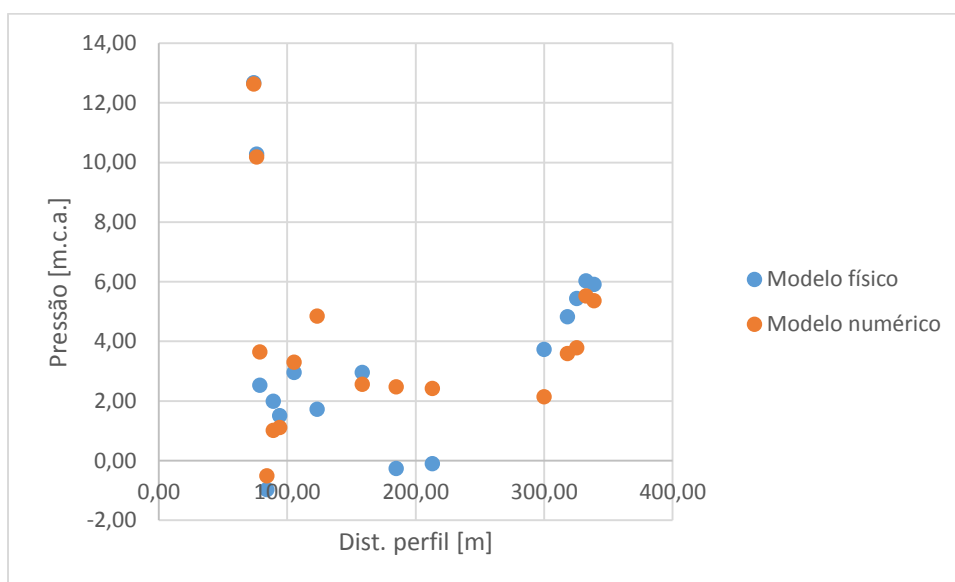


Figura 60 – Comparação entre os valores de pressão na soleira do DCC obtidos através dos modelos físico e computacional para $Q = 527 \text{ m}^3/\text{s}$

6.3.5 PRESSÕES PARA O CAUDAL DE $303 \text{ m}^3/\text{s}$

Na Figura 61 é apresentada a comparação dos valores de pressão para o caudal de $303 \text{ m}^3/\text{s}$. Verifica-se, nos resultados apresentados na referida figura, uma grande concordância, em termos gerais, dos resultados obtidos nas para os dois modelos, numérico e físico. Verifica-se ainda, à semelhança do registado nos casos anteriores, a persistência da maior discrepância dos valores de pressão para a posição relativa às tomadas de pressão 10 e 11 em modelo físico.

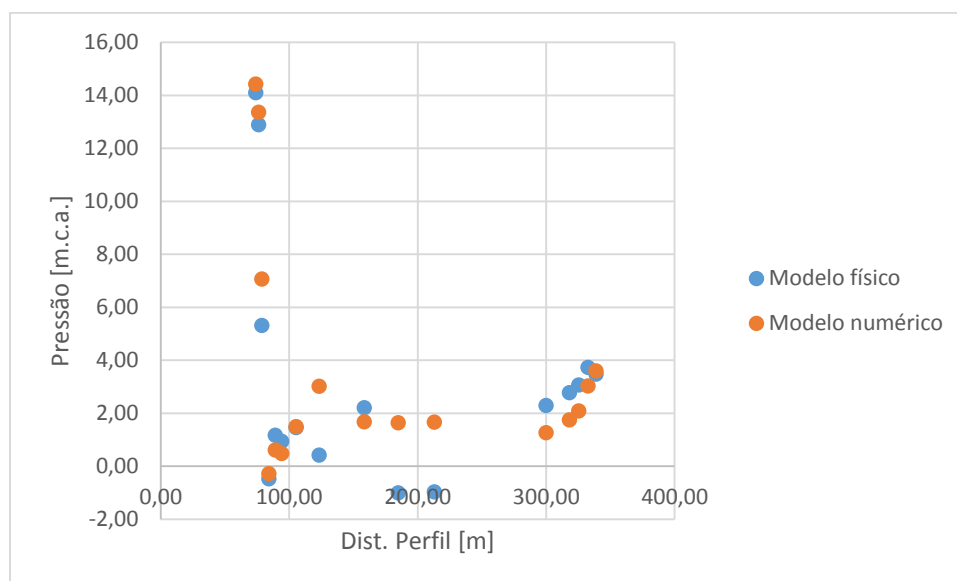


Figura 61 – Comparação entre os valores de pressão na soleira do DCC obtidos através dos modelos físico e computacional para $Q = 303 \text{ m}^3/\text{s}$

6.4 ALCANCE DO JATO

O alcance do jato assume uma especial importância na caracterização dos efeitos sobre as erosões das margens e leito do rio.

Da análise dos valores obtidos nas simulações numéricas dos diferentes caudais, que podem ser observadas nas colunas 4 e 5 da Tabela 27, pode verificar-se o maior alcance do jato do vão esquerdo em relação ao vão do lado direito. Pode também observar-se, como era espectável, o maior alcance dos jatos resultantes de descargas maiores. A diferença entre os alcances obtidos nas simulações numéricas para os diferentes caudais é tanto maior quanto maior o caudal descarregado. O zero do referencial considerado para a obtenção dos resultados apresentados é o ponto mais distante da estrutura do DDC e sendo a orientação do referencial o alinhamento da estrutura final do trampolim. Na Tabela 27 é apresentada a comparação dos valores do alcance máximo do jato obtidos através dos modelos físico e computacional.

Tabela 27 – Comparação do alcance máximo dos jatos para os modelos físico e computacional

	Alcance máximo do jato (m)				Diferença absoluta (m)		Diferença relativa (%)	
	Modelo físico		Modelo computacional					
Caudal (m³/s)	Vão esquerdo	Vão direito	Vão esquerdo	Vão direito	Vão esquerdo	Vão direito	Vão esquerdo	Vão direito
2062	80,6	70,1	80,04	69,05	0,6	1,1	0,69	1,50
896	74,4	64,8	71,00	60,63	3,4	4,2	4,58	6,44
590	70,1	60,1	67,41	59,77	2,7	0,3	3,84	0,55
527	68,2	58,3	63,93	53,88	4,3	4,4	6,26	7,59
303	59,5	47,1	50,73	46,98	8,8	0,1	14,73	0,26

Dos valores obtidos há que destacar a diferença máxima, em termos absolutos, de 8,8 metros respeitante ao jato máximo para o vão esquerdo e para o caudal de $303 \text{ m}^3/\text{s}$. Esta diferença

máxima em termos absolutos corresponde também à diferença máxima, em termos relativos, de 14,73 %, por sinal correspondente ao caudal de menor valor (303 m³/s). Para todos os restantes (4) valores a diferença absoluta e relativa (percentual) são inferiores a metade dos correspondentes valores referidos, sendo que para o caudal de projeto (2062 m³/s) o alcance máximo do jato obtido por simulação numérica tem um erro inferior a 2%. Será de salientar que, para todos os caudais considerados, o alcance obtido através da simulação numérica apresenta um valor inferior ao obtido em modelo físico.

6.5 VELOCIDADES

A caracterização da velocidade para as diferentes simulações numéricas foi efetuada com recurso a uma análise das componentes da velocidade segundo os três eixos (X,Y e Z) do modelo computacional, para os pontos de medição considerados no estudo em modelo físico reduzido. Esta análise tridimensional resulta do facto de o *software* Flow 3D apenas fornecer, em formato numérico, as velocidades para cada uma daquelas direção, não sendo possível extrair diretamente, em cada célula, o módulo de velocidade (ou resultante vetorial) correspondente.

6.5.1 VELOCIDADES NO MODELO COMPUTACIONAL

São apresentados em seguida os valores de velocidade obtidos nas diferentes secções de medição, representadas na Figura 9, para as diferentes simulações numéricas em que se realizou um estudo de velocidades (2062 e 896 m³/s).

6.5.1.1 Velocidades para o caudal de 2062 m³/s

As velocidades obtidas na simulação numérica para o caudal de projeto, $Q = 2062 \text{ m}^3/\text{s}$, são apresentadas na Tabela 28.

Tabela 28 – Velocidades do modelo computacional para o caudal de 2062 m³/s

	Secção	Coordenada de medição			Velocidades			Módulo de
		[m]			[m/s]			velocidade
		X	Y	Z	X	Y	Z	[m/s]
Vão direito	v1	69,40	47,00	67,75	5,26	-0,22	1,55	5,48
	v3	321,75	36,20	25,00	14,84	1,10	2,13	15,03
	v5	337,25	39,00	27,80	26,91	6,47	3,33	27,88
Vão esquerdo	v1	69,40	46,20	67,75	2,26	-0,03	1,70	2,82
	v4	325,75	43,40	24,20	23,36	3,95	2,17	23,79
	v6	344,75	47,80	30,20	25,64	7,42	7,49	27,72

Dos valores obtidos para a velocidade no modelo computacional denota-se a maior velocidade do vão direito em relação ao vão esquerdo para a secção de medição v1 (única comum aos dois vãos). É possível verificar também que existe uma velocidade com igual ordem de grandeza para as secções de medição v5 e v6, secções terminais e de saída de cada vão descarregador. A velocidade máxima registada nas secções de medição na inflexão em perfil do DCC é respeitante ao vão esquerdo, para a secção de medição v4 e apresenta um valor de 23,79 m/s. Contudo este valor de velocidade (correspondente à secção v4), quando comparado com o valor obtido para a velocidade

na secção v3 do vão direito, não pode ser dissociado da sua posição mais a jusante, no descarregador, mesmo sendo na zona de inflexão do DCC em planta. Este facto poderá justificar a magnitude da diferença de velocidades registada.

6.4.2.2 Velocidades para o caudal de 896 m³/s

Para o caudal de 896 m³/s, foram obtidas as velocidades apresentadas na Tabela 29.

Das velocidades registadas no modelo computacional há a salientar a existência, de modo geral e à semelhança do registado para o caudal de projeto, uma maior velocidade no vão direito em relação ao vão esquerdo, nomeadamente na secção v2 e secções de saída v5 e v6.

Há a denotar ainda a existência de velocidades muito semelhantes ou mesmo iguais na secção v1, início da soleira normal, e para as secções v3 e v4, respeitantes à inflexão do traçado em perfil. A velocidade igual registada para a secção v1 poderá estar relacionada com o facto de existir um fecho parcial da comporta no descarregador. Este fecho parcial da comporta leva a um aumento do nível de água, a uma diminuição da velocidade e a uma estabilização maior do escoamento a montante da comporta, local onde se situa a secção de medição v1.

Tabela 29 – Velocidades do modelo computacional para o caudal de 896 m³/s

	Secção	Coordenada de medição			Velocidades			Módulo de
		[m]			[m/s]			velocidade
		X	Y	Z	X	Y	Z	[m/s]
Vão direito	v1	69,40	47,00	67,75	2,70	-0,35	0,59	2,79
	v2	76,20	36,20	69,25	8,87	0,77	-1,95	9,11
	v3	321,75	36,20	25,00	25,94	2,50	0,39	26,06
	v5	337,25	39,00	27,80	26,56	6,45	3,56	27,56
Vão esquerdo	v1	69,40	46,20	67,75	2,72	0,09	0,62	2,79
	v2	76,20	47,80	69,25	8,52	-0,91	-1,76	8,75
	v4	325,75	43,40	24,20	26,20	2,69	1,17	26,36
	v6	344,75	47,80	30,20	21,44	6,55	6,39	23,31

6.5.2 COMPARAÇÃO DAS VELOCIDADES DO ESCOAMENTO PARA OS CAUDAIS EM ESTUDO

A comparação de velocidades entre os dois modelos é um processo difícil e de extrema sensibilidade, dado que existem valores de ordem de grandeza diferentes e que distam pouco. Existem muitos aspetos que poderão afetar a precisão dos resultados obtidos e/ou a medição correta dos valores. Se por parte do modelo físico existe um fator de incerteza associado à dificuldade de medição de velocidades (Muralha *et al.*, 2014), existe também, por parte do modelo computacional, um fator de incerteza associado à exata definição dos pontos para posterior obtenção dos resultados e posterior comparação. Poderá ainda existir um outro fator de imprecisão numérica, relacionado com os modelos de viscosidade e turbulência adotados na construção da atual simulação numérica (como por exemplo os modelos RNG, k – ω , etc.).

No Anexo D.3 são apresentadas as imagens respeitantes às distribuições das velocidades nas secções de medição, v1 a v6 e representadas em perfil na Figura 9.

6.5.2.1 Comparação das velocidades obtidas para o caudal de 2062 m³/s

Na Tabela 30 é possível observar a comparação dos valores de velocidades obtidos para as simulações numérica e física.

Tabela 30 – Comparação dos valores de velocidade obtidos para o caudal de 2062 m³/s

	Secção	Velocidade modelo computacional [m/s]	Velocidade modelo físico [m/s]	Diferença [m/s]
Vão direito	v1	5,48	11,00	-5,52
	v3	15,03	27,00	-11,97
	v5	27,88	38,80	-10,92
Vão esquerdo	v1	2,82	9,90	-7,08
	v4	45,98	-	-
	v6	27,72	22,40	5,32

Na Figura 62 pode ser observada a comparação gráfica das velocidades obtidas nas diferentes secções para o caudal de projeto.

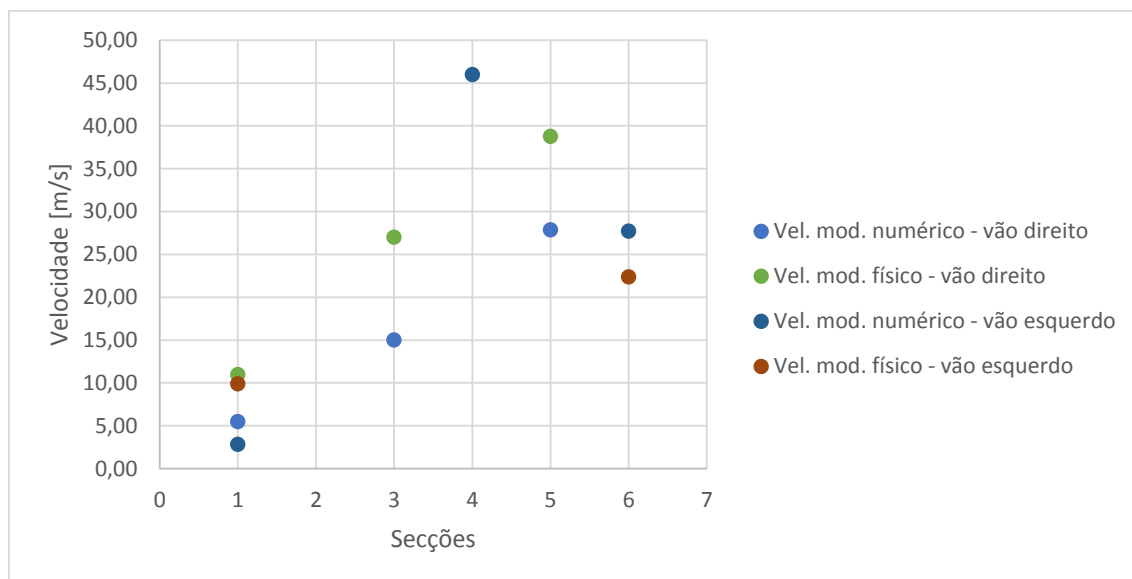


Figura 62 – Comparação das velocidades nas diferentes secções para o caudal de 2062 m³/s

Dos resultados obtidos há a registar a ocorrência de máximos e mínimos absolutos para as mesmas secções de medição. Existe também uma semelhança entre os dois modelos no que respeita à existência de velocidades superiores no vão direito em relação ao vão esquerdo. No entanto, verifica-se uma diferença significativa entre os valores de velocidade obtidos pelos dois modelos.

Existe também a registar um valor de velocidade muito elevado para a secção de medição v4. A velocidade registada através do cálculo numérico é assim muito alta e congruente com o facto de não ter sido possível a estabilização do molinete (dispositivo de medição de velocidade) no modelo físico, para registo da velocidade (Muralha *et al.*, 2014). Também se verificam valores de velocidade inferiores para o modelo computacional.

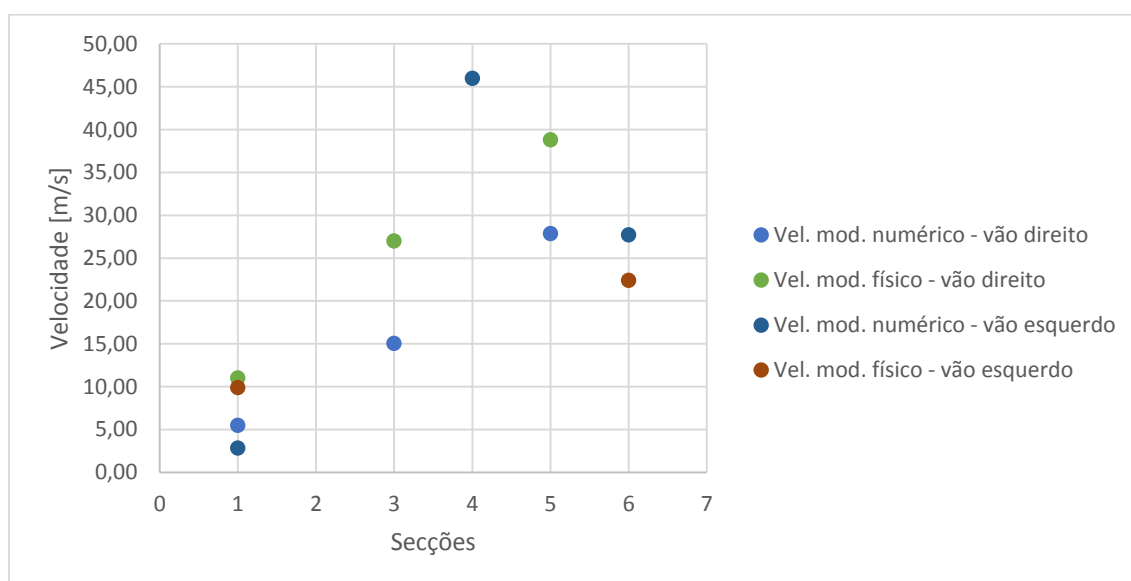
6.5.2.2 Comparação das velocidades obtidas para o caudal de 896 m³/s

É apresentada na Tabela 31 a comparação dos valores de velocidade nas duas simulações.

Tabela 31 – Comparação dos valores de velocidade obtidos para o caudal de 896 m³/s

Secção	Velocidade modelo computacional [m/s]	Velocidade modelo físico [m/s]	Diferença [m/s]
Vão direito	v1	2,79	3,70
	v2	9,11	13,50
	v3	26,06	26,90
	v5	27,56	40,40
Vão esquerdo	v1	2,79	3,50
	v2	8,75	11,90
	v4	26,36	26,90
	v6	23,31	26,20

Na Figura 63 é possível observar a comparação dos resultados acima apresentados e que respeitam às velocidades obtidas nas diferentes secções para o caudal de 896 m³/s.

Figura 63 – Comparação das velocidades nas diferentes secções para o caudal de 896 m³/s

De referir em relação aos resultados obtidos, e à semelhança do ponto anterior, a concordância entre os dois modelos no que respeita a mínimos e máximos e à velocidade superior, na generalidade, do vão direito em relação ao vão esquerdo.

Verifica-se também em modelo computacional a existência de valores de velocidade iguais em ambos os vãos para a secção de entrada v1. De constatar ainda, e à semelhança do registado para o caudal de projeto, a existência de valores de velocidade inferiores para o modelo computacional. Da comparação efetuada verifica-se que as velocidades em modelo computacional não ultrapassam os 30 m/s enquanto se registou, em modelo físico, uma velocidade máxima de 40 m/s para a secção de medição v5. É também verificada a diferença máxima nas velocidades entre os dois modelos para a referida secção.

7

Conclusões

7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo apresentado na presente dissertação recai sobre a modelação numérica de um descarregador de cheias, em que é realizada uma aplicação de um modelo numérico CFD ao caso de estudo do Descarregador de Cheias Complementar (DCC) de Caniçada. Para validação dos valores numéricos obtidos foi efetuada uma análise comparativa a caracterização do escoamento em modelo físico.

O processo de calibração, designadamente o teste de sensibilidade das diferentes opções de cálculo numérico, é por vezes moroso e acarreta uma verificação dos resultados obtidos com dados experimentais de modelos físicos ou dados de campo, sempre que possível. O DCC de Caniçada, como estrutura de elevada complexidade (ver Figura A.1 e A.2 do Anexo A), traduz-se num exercício de difícil análise numérica e representação geométrica 3D. O estudo rigoroso das condições a incorporar no modelo computacional para a sua calibração é consequentemente de uma elevada complexidade. Em termos de representação geométrica do descarregador, tratando-se de um projeto com elevada complexidade, a definição virtual do descarregador em 3D traduziu-se numa tarefa particularmente morosa. O modelo computacional consequente apresenta dimensões consideráveis (modelo computacional de dimensões finais: 525 x 125 x 83 m, ver Figura D10 do Anexo D), pelo que o tempo de cálculo é consequentemente muito elevado (na ordem média do 4 dias).

Os testes levados a cabo, no âmbito da presente dissertação de mestrado, no modelo reduzido de Caniçada, construído no LNEC no âmbito de um estudo para a EDP (ver Figura B1 do Anexo B), e publicados pelo LNEC em Nota Técnica (Muralha *et al.*, 2014), permitem caracterizar o escoamento em diferentes pontos e secções para as grandezas de pressão, alturas de escoamento, velocidades e alcance do jato. Esses valores foram utilizados na presente dissertação para calibração e comparação de resultados do modelo computacional.

Para garantir a ligação do modelo computacional ao caso de estudo foram efetuados estudos iniciais que permitiram obter uma sensibilidade do *software* Flow 3D (modelo numérico utilizado) a diferentes parâmetros numéricos. Nesta análise inicial denominada de testes de sensibilidade foi estudada uma simulação 2D de diferentes tipos de soleiras normais. Uma

primeira análise para uma soleira normal de paramento vertical com posterior comparação de valores de pressão com ábacos da USACE (United States Army Corps of Engineers) e posteriormente uma análise para uma soleira normal de paramento inclinado com a comparação dos valores de pressão e caudal descarregado com os valores obtidos na simulação física no modelo reduzido do DCC de Caniçada. Dos testes de sensibilidade 2D conduzidos para comparação com valores de pressão obtidos através dos ábacos da USACE há a salientar a boa aproximação do modelo computacional aos resultados dos referidos ábacos. No referido teste é demonstrada a capacidade do modelo computacional de obtenção de resultados de pressão. No entanto é denotada uma discrepância nos valores de pressão próximos da crista do descarregador. No ensaio complementar a este e que visava ainda a comparação dos valores numéricos com os ábacos de pressão em soleiras WES da USACE foi evidenciada a mais-valia da consideração de fenómenos de emulsão de ar no escoamento sobre o descarregador para a obtenção de resultados mais robustos.

Os restantes ensaios 2D foram realizados para um modelo com soleira normal e paramento inclinado, situação equivalente à situação de entrada do descarregador. Estes testes foram desenvolvidos para calibração do *software* Flow 3D pelo que foram testadas a influência de diferentes parâmetros, sendo esses a: consideração de equações de 1ª ou 2ª ordem; dimensão das células de cálculo; emulsão de ar em situação de paramento inclinado; consideração de velocidade inicial na fronteira de entrada; pressão hidrostática na fronteira de entrada; comprimento da zona de aproximação com caudal fixo de entrada; comprimento da zona de aproximação reduzido com pressão hidrostática na fronteira de entrada. A validação destes testes de sensibilidade foi efetuada com recurso à comparação de resultados de pressão, caudais descarregados e influência das diferentes condições nos tempos de cálculo. Da análise dos testes de sensibilidade verifica-se, de modo geral, a concordância dos valores de pressão, com exceção da obtenção de resultados díspares na zona da crista do descarregador. Verifica-se também: a vantagem da opção de equações de resolução da quantidade de movimento de 2ª ordem em detrimento das de 1ª ordem, por acréscimo da robustez dos resultados obtidos; a não necessidade de refinamento excessivo da malha para valores inferiores a 0,5 m; a vantagem na consideração de emulsão de ar para o modelo de paramento inclinado; a incapacidade de simular com correção os caudais descarregados para o modelo com condição de entrada “velocidade fixa”; a capacidade de cálculo dos caudais através da definição da pressão hidrostática na fronteira de entrada; a vantagem para simulação de caudais da opção caudal fixo de entrada; e a possibilidade de consideração de uma zona de aproximação mais reduzida para a estimação de caudais e pressões. Dos testes de sensibilidade 3D para estimar a capacidade de simulação do caudal descarregado através da definição de uma pressão específica de entrada, a definição de caudal fixo de entrada e a influência do refinamento da malha, há a destacar a obtenção de valores muito concordantes para o caudal descarregado nos dois primeiros ensaios e a não necessidade de refinamento excessivo da malha de cálculo sob pena de incrementar excessivamente o tempo de cálculo.

Tendo por base os testes de sensibilidade efetuados para calibração foi formulado o modelo computacional final, para o qual foram realizados ensaios para uma gama de 5 caudais diferentes. Verificou-se, de um modo geral, a obtenção de alturas de escoamento menores para caudais menores; valores de pressão menores nas tomadas de pressão da secção inicial do descarregador (com exceção das duas secções em que se compararam valores com resultados do modelo reduzido e nas secções correspondentes às primeiras tomadas de pressão em modelo físico para caudais em que as comportas de entrada estão parcialmente abertas); registo de valores de pressão maiores para as tomadas de pressão respeitantes às implantadas no muro lateral direito do descarregador, quando comparadas com as presentes no muro esquerdo; o alcance menor do jato

oriundo do vão direito face ao alcance do jato oriundo do vão esquerdo do DCC; e velocidades ligeiramente superiores no vão direito em relação ao vão esquerdo.

A obtenção de alturas de escoamento menores em relação ao fundo do descarregador para as diferentes secções de medição nos caudais menores (com comportas de entrada mais fechadas) foi verificada em toda a gama de caudais simulados. Além deste facto, há a registar que para o caudal menor, de 303 m³/s, se observa o descolamento do jato na estrutura terminal.

No que concerne aos valores de pressão, será expectável a existência de valores mais próximos de zero ou mesmo negativos na zona de entrada do descarregador, resultado da configuração de entrada do DCC de Caniçada. A referida secção de entrada é constituída por uma soleira normal e a razão entre a altura de dimensionamento e a efetiva (H/H_d) nos estudos desenvolvidos é superior a 1. A existência de valores de pressão superiores no muro lateral direito do descarregador face ao muro esquerdo era também espectável dada a configuração do descarregador em planta. Também fruto da configuração do descarregador em planta e em perfil é o menor alcance do jato oriundo do vão direito face ao jato oriundo do vão esquerdo. A obtenção genérica de velocidades ligeiramente superiores no vão direito em relação ao vão esquerdo para secções de estudo equivalentes de estudo poderá ser justificada pelas condições de aproximação. Estas condições de aproximação terão uma influência mais notória nas primeiras secções estudadas nomeadamente no que respeita aos valores de pressão e velocidades. Existe também a influência da configuração do descarregador na parte final do mesmo, nomeadamente na orientação do jato descarregado e na distribuição dos valores de pressão nas tomadas laterais.

Da comparação estabelecida, para as diferentes grandezas, entre o modelo computacional final e o modelo físico há a destacar:

- A boa relação entre os caudais descarregados no modelo físico e computacional, com valores de desvio inferiores a 6% para todos os caudais testados em estudo, sendo de destacar também o erro inferior a 0,5% para a situação com as comportas totalmente abertas, caudal de projeto. Para os restantes casos, com as comportas parcialmente abertas, os desvios obtidos são da ordem dos 5%. Os valores superiores de desvio entre os valores obtidos para os modelos físico e o modelo computacional para as situações com comportas parcialmente abertas poderão estar também relacionados com a dificuldade de definição criteriosa de uma abertura de comporta equivalente nos para os diferentes modelos.
- No que respeita às alturas de escoamento os resultados obtidos pelo modelo computacional são satisfatórios. No entanto, a relação entre o modelo computacional e físico não é absolutamente concordante para todas as secções e/ou caudais, verificando-se uma melhor correspondência para as secções intermédias da galeria do descarregador. Contudo, há a realçar que em termos de variação das alturas de escoamento existe uma grande semelhança qualitativa, principalmente no que concerne à variação entre secções e, ainda que de forma menos generalizada, a pontos de inflexão no perfil da superfície livre do escoamento nas diferentes secções. Os maiores desvios em termos de alturas de escoamento foram verificados para as secções finais do descarregador, nomeadamente para as secções de saída.
- Para os valores de pressão existe, modo geral, uma boa correspondência entre os valores obtidos em modelo físico e computacional, registando-se, uma vez mais, uma boa relação entre os resultados em modelo físico reduzido e em modelo numérico, em termos qualitativos. Para os valores de pressão na soleira do descarregador a variação entre os valores de pressão em secções consecutivas são muito correspondentes. Em termos

quantitativos há a realçar a existência de valores de pressão díspares para os pontos correspondentes às tomadas de pressão 10 e 11 (com localização representada na Figura 9). Esta medição de valores de pressão apenas nos pontos relativos às mesmas tomadas de pressão é um sinal de que o escoamento atinge sensivelmente as mesmas cotas em ambos os modelos. De destacar também a obtenção de valores de pressão próximos, em termos quantitativos, para as tomadas de pressão instaladas nos muros laterais do descarregador.

- A comparação entre os valores do alcance do jato para os modelos físico e computacional apresentou uma boa correspondência, principalmente para os caudais mais elevados. Os erros obtidos para o alcance do jato são inferiores a 10% com a exceção do jato oriundo do vão esquerdo para o caudal mínimo ensaiado. Há a denotar que os valores obtidos para o alcance do jato no modelo computacional são inferiores ao registado em modelo físico. Há a referir que a medição ou determinação do alcance do jato é um processo de elevada dificuldade tanto em termos físicos como numéricos, sendo que a delimitação do alcance é um processo difícil. Dadas as referidas circunstâncias poder-se-á afirmar que os resultados obtidos são bastante satisfatórios.
- Por fim, da comparação efetuada para os valores velocidade, há a realçar a boa correspondência dos resultados em termos qualitativos no que respeita à variação entre secções, registando-se uma variação de velocidades semelhante entre as diferentes secções de estudo para os dois vãos do descarregador nos diferentes modelos, computacional e físico. No entanto, principalmente no caso do caudal de projeto, os valores de velocidade obtidos pelo modelo físico e computacional nem sempre registaram a mesma ordem de grandeza, chegando a registar-se uma diferença máxima, entre os dois modelos (físico e computacional), de 13 m/s. Esta diferença poderá estar relacionada com a dificuldade de medição de velocidades em modelo físico visto que as maiores desconcordâncias ocorrem principalmente para o caudal de projeto, de valor superior.

7.2 CONCLUSÕES

De um modo geral pode afirmar-se que os resultados numéricos são bastantes concordantes com os registados em modelo físico. Ressalva-se no entanto a existência de algumas discrepâncias entre os valores obtidos nos dois modelos para os valores relativos a alturas de escoamento e velocidades. Para estas duas grandezas embora exista uma boa relação qualitativa, nem sempre os resultados são correspondentes em termos quantitativos, sendo esta relação dependente das diferentes secções transversais em estudo.

Em suma, o modelo computacional construído no *software* comercial Flow 3D, apresenta uma boa relação com o modelo físico principalmente no que concerne ao cálculo e previsão de caudais descarregados para as diferentes aberturas de comporta, variação qualitativa de pressão ao longo do descarregador, alcance do jato e velocidades em caudais de menor ordem de grandeza. Este facto enuncia uma capacidade de simulações numéricas no apoio a estudos de elevada complexidade nomeadamente na: definição primária em zonas de pressão máximas e mínimas na soleira; previsão de pressões laterais; orientação e direção dos jatos descarregados e previsão inicial do alcance dos mesmos; e regiões de velocidades máximas e mínimas. No entanto, a simulação física ainda é muito necessária para a correta definição de grandezas que exigem, em modelo computacional, um processo de calibração rebuscado e que não é possível no presente sem a existência de um modelo físico. Como tal, crê-se que os modelos CFD são uma ferramenta útil principalmente na definição inicial de estruturas complexas e que se afiguram de futuro como uma ferramenta/instrumento potente útil de apoio e suporte ao projeto.

7.3 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Embora a presente dissertação recaia sobre um caso de estudo específico e tenha objetivos bem definidos, algumas das questões reveladas pelo trabalho permitem apontar a conveniência de desenvolvimentos e análises futuras, suplementando o trabalho desenvolvido.

Os modelos CFD são exigentes computacionalmente, como tal é proposta a aplicação dos presentes modelos a computadores ligados em rede e com processadores partilhados, conhecidos como “ilhas”. Este facto permitiria velocidades de cálculo maiores e seria bom perceber a influência no tempo de cálculo bem como na possibilidade de requerer maior precisão para o mesmo tempo do cálculo convencional.

Ainda no seguimento do presente trabalho e no estudo de caso de Caniçada, um trabalho a realizar em trabalhos de futuros estudos numéricos de descarregadores complementares seria a simulação da situação de descarga conjunta de diferentes descarregadores. O referido estudo permitiria obter a perceção da capacidade de um modelo computacional efetuar a correta simulação de valores com descarga conjunta em termos de pressões globais, velocidades na albufeira, entre outros.

Um outro trabalho complementar ao presente trabalho passaria pelo desenvolvimento de estudos mais pormenorizados na avaliação da capacidade dos modelos numéricos em simular os diferentes fenómenos de escoamento na zona de crista de um descarregador de soleira normal. O estudo a realizar deveria focar principalmente os valores de pressão e velocidade na referida zona de crista de uma soleira normal.

Modelação numérica 3D de escoamentos em descarregadores de cheia.

Aplicação ao descarregador de cheias complementar do aproveitamento hidroelétrico da Caniçada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andersson, A. G.; Andreasson, P.; Lundström, T. S. (2013). *CFD-Modelling and validation of free surface flow during spilling of reservoir in down-scale model*. Division of Fluid and Experimental Mechanics, Luleå University of Technology. Luleå, Suécia.
- Bhajantri, M. R.; Eldho, T. I.; Deolalikar, P. B. (2006). *Hydrodynamic modelling of flow over a spillway using a two-dimensional finite volume-based numerical model*. Journal Sadhana, Volume 31. India.
- Casey, M.; Wintergerste, T. (2000). *Best Practice Guidelines*. Fluid Dynamics Laboratory, Sulzer Innotec. Suíça.
- Chanel, P. G. (2008). *An Evaluation of Computational Fluid Dynamics for Spillway Modeling*. Department of Civil Engineering, University of Manitoba. Winnipeg, Manitoba, Canadá.
- Cleary, P. M.; Prakash, M. (2004). *Discrete–element modelling and smoothed particle hydrodynamics: potential in the environmental sciences*. The Royal Society.
- Clohan, W. D. (2015). *Three-Dimensional Numerical Simulations of Subaerial Landslide Generated Waves*. The University of British Columbia. Vancouver, Canadá.
- Couto, L. T.; Melo, J. F.; Muralha, A. (2013). *Barragem de Caniçada. Descarregador de Cheias Complementar. Estudo em Modelo Hidráulico Reduzido. Definição das Formas Alternativas da Plataforma de Aproximação e Estrutura de Entrada*. LNEC. Lisboa, Portugal.
- Couto, L. T.; Muralha, A.; Alvarez, T.; Sardinha, R.; Oliveira, M.; Dias da Silva, J. (2014). *Descarregador Complementar da Barragem de Caniçada: Projeto e Ensaios Hidráulicos em Modelo Reduzido*. Exposição ao 12.º Congresso da Água / 16.º ENASB / XVI SILUBESA. Lisboa, Portugal.
- Daneshkhah, A.; Vosoughifar, H. (2012). *Solution of Flow Field Equations to Investigate the Best Turbulent Model of Flow over a Standard Ogee Spillway in Finite Volume Method*. Islamic Azad University. Teerão, Irão.
- Dargahi, B. (2006). *Experimental Study and 3D Numerical Simulations for a Free-Overflow Spillway*. Journal of Hydraulic Engineering, Volume 132.
- Didier, E. (2007). *Modelação numérica de escoamentos com superfície livre*. Faculdade de Ciências e Tecnologia; Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, Portugal.
- EDP (2011). *Declaração Ambiental 2011. Aproveitamentos Hidroelétricos da Direção de Produção Hidráulica*. Portugal.
- Erfanain-Azmoudeh, M.-H.; Kamanbedast, A. A. (2013). *Determine the Appropriate Location of Aerator System on Gotvandoliadam's Spillway Using Flow 3D*. American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.. IDOSI Publications.
- Estacio, K. C.; Ferreira, V. G.; Nonato, L. G.; Mangiavacchi, N. (2006). *Método meshless para simulação de escoamentos de fluidos em cavidades de moldes*. Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, ICMC, Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil.
- Fasshauer, G.. *Arnoldi Iteration and GMRES*. Visitado online no dia 24 de Junho de 2014, em http://www.math.iit.edu/~fass/477577_Chapter_14.pdf. Department of Applied Mathematics, Illinois Institute of Technology. Illinois, EUA.
- FLOW 3D Documentation (2014), Release 11.0.0 da Flow Science, Inc.

- Fortuna, A. O. (2000). *Técnicas Computacionais para a Dinâmica de Fluidos: Conceitos básicos e aplicações*. Edusp – Editora da Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil.
- Gonçalves, N. D. F. (2007). *Método dos Volumes Finitos em Malhas Não-Estruturadas*. Departamento de Matemática Aplicada / Departamento de Matemática Pura, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Porto, Portugal.
- Hirt, C. W.; Cook, J. L.; Butler, T. D. (Fevereiro, 1970). *A lagrangian method for calculating the dynamics of an incompressible fluid with free surface*. Journal of Computational Physics.
- Hirt, C.W.; Nichols, B.D. (Janeiro, 1981). *Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries*. Journal of Computational Physics.
- Ho, D. K. H.; Donohoo, S. M.; Boyes, K. M. (2003). *Numerical analysis and the real world it looks pretty but is it right?*. Advanced Analysis, Worley. Sydney, Austrália.
- http://www.a-nossa-energia.edp.pt/centros_produtores/info_tecnica.php?item_id=15&cp_type=he§ion_type=info_tecnica. Caniçada, informação técnica. EDP. Visto em Outubro de 2014.
- http://www.cfd-online.com/Wiki/K-omega_models, *K-omega model*. CFD-online. Visto em Julho de 2014
- http://www.flow3d.com/home/products/Flow_3D/. *Flow 3D*. Flow Science, Inc. Visto em Janeiro de 2015.
- Jacobsen, J.; Olsen, N. R. B. (2010). *Numerical modelling of the capacity for a complex spillway*. Proceedings of the ICE - Water Management, Volume 163.
- Jiyuan, T.; Yeoh, G. H.; Liu, C. (2013), *Computational Fluid Dynamics*. 2ª Edição. Elsevier. Waltham, USA.
- Johnson, M. C.; Savage, B. M. (2006). *Physical and Numerical Comparison of Flow over Ogee Spillway in the Presence of Tailwater*. Journal of Hydraulic Engineering, Volume 132.
- Kim, D. G.; Park, J. H. (2005). *Analysis of flow structure over ogee-spillway in consideration of scale and roughness effects by using CFD model*. Journal of Civil Engineering, Volume 9.
- Le, H.; Moin, P.; Kim, J. (Janeiro, 1997). *Direct numerical simulation of turbulent flow over a backward-facing step*. Journal of Fluid Mechanics.
- Lemos, F. O. (1981). *Critérios para o dimensionamento hidráulico de barragens descarregadoras*. LNEC. Lisboa, Portugal.
- Molls, T.; Chaudhry, M. H. (1995). *Depth-Averaged Open-Channel Flow Model*. Journal of Hydraulic Engineering.
- Morales, V.; Tokyay, T. E.; Garcia, M. (2012). *Numerical modeling of Ogee Crest Spillway and tainter gate structure of a diversion Dam on Canar river, Ecuador*. XIX International Conference on Water Resources. University of Illinois at Urbana-Champaign. Illinois, EUA.
- Muralha, A.; Brandão, L.; Couto, L. T. (2014). *Barragem de Caniçada. Descarregador de Cheias Complementar: Medições em Modelo Hidráulico Reduzido para Calibração de Modelo Numérico*. Nota Técnica 04/2014, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa. Portugal.
- Muralha, A.; Couto, L. T. (2013). *Barragem de Caniçada. Estudo das Formas de Projeto do Descarregador de Cheias Complementar*. LNEC. Lisboa, Portugal.
- Neto, A. S.; Mansur, S. S.; Silvestrini, J. H. (2002). *Equações da torbulência: Média versus filtragem*. Universidade Federal de Uberlândia. Brasil.

- Nguyen, C. (2005). *Turbulence Modeling*. Massachusetts Institute of Technology (MIT). Massachusetts, EUA.
- Odier, P.; Chen, J.; Rivera, M. K.; Ecke, R. E. (2009). *Fluid Mixing in Stratified Gravity Currents: The Prandtl Mixing Length*. Physical review letters, n.º 102.
- Olsen, N. R. B.; Kjellesvig, H. M. (1998). *Three-dimensional numerical flow modelling for estimation of spillway capacity*. Journal of Hydraulic Research, Volume 36.
- Petry, A. P. (2002). *Análise numérica de escoamentos turbulentos tridimensionais empregando o método de elementos finitos e simulação de grandes escalas*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Brasil.
- Robertson, G. R. (2014). *Labyrinth Weir Hydraulics: Validation of CFD Modelling*. Stellenbosch University. Stellenbosch, África do Sul.
- RSB - Regulamento de Segurança de Barragens, Lisboa: Decreto-Lei n.º 344/2007. Diário da República, 2007
- Saunders, K.; Prakash, M.; Cleary, P. W.; Cordell, M. (2014). *Application of Smoothed Particle Hydrodynamics for modelling gated spillway flows*. Elsevier, Jornal online: ScienceDirect, 15 Maio 2014.
- Savage, B. M.; Johnson, M. C. (2001). *Flow over Ogee Spillway: Physical and Numerical Model Case Study*. Journal of Hydraulic Engineering, Volume 127.
- Siegel, R.; Molls, F. B. (Outubro de 1992). *Finite difference solution for transient radiative cooling of a conducting semitransparent square region*. International Journal of Heat and Mass Transfer.
- Silva, M. R. (2014). *Modelação numérica 3D de escoamentos em descarregadores de cheias com escoamento em superfície livre. Descarregador complementar de Salomonde*. Instituto Superior Técnico. Lisboa, Portugal.
- Simões, F. J. M. (2015). *Hydraulic Modeling Development and Application in Water Resources Engineering*. Center for Computational Hydroscience and Engineering, The University of Mississippi. Mississippi, EUA.
- Sociedade Atlas Copco de Portugal. Ltd. (2014). *Revista construção e minas, n.º 2 (2014)*. Schlieff, Lda. Portugal.
- Song, C. C. S.; Zhou, F. (1999). *Simulation of Free Surface Flow over Spillway*. Journal of Hydraulic Engineering, Volume 125.
- Teklemariam, E.; Korbaylo, B. W.; Groeneveld, J. L.; Fuchs, D. M. (2002). *Computational fluid dynamics: diverse applications in hydropower project's design an analysis*. CWRA 55th Annual Conference – Winnipeg, MB. Vinipegue, Canadá.
- Tsai, C.-P.; Yen, C.-C.; Lin, C. (2014). *Simulations on Skimming Flow over a Vertical Drop Pool*. American Society of Civil Engineers. EUA.
- Unami, K.; Kawachi, T.; Babar, M.; Itagaki, H. (1999). *Two-Dimensional Numerical Model of Spillway Flow*. Journal of Hydraulic Engineering, Volume 125.
- USACE – American Army Corps of Engineers (1970). *Hydraulic Design Criteria III-16*. Vicksburg, Mississippi. EUA.
- Vianna Jr., A. S.; Siqueira, F. C. S.; Radusweski, L.; Lima, A. L. S. (2014). *CFD e a Defesa Química*. Revista Virtual Química, n.º 6. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Brasil.

Yakun, G.; Xianyun, W.; Chigong, W.; Duo, F. (1998). *Numerical modelling of spillway flow with free drop and initially unknown discharge*. Journal of Hydraulic Research, Volume 36.

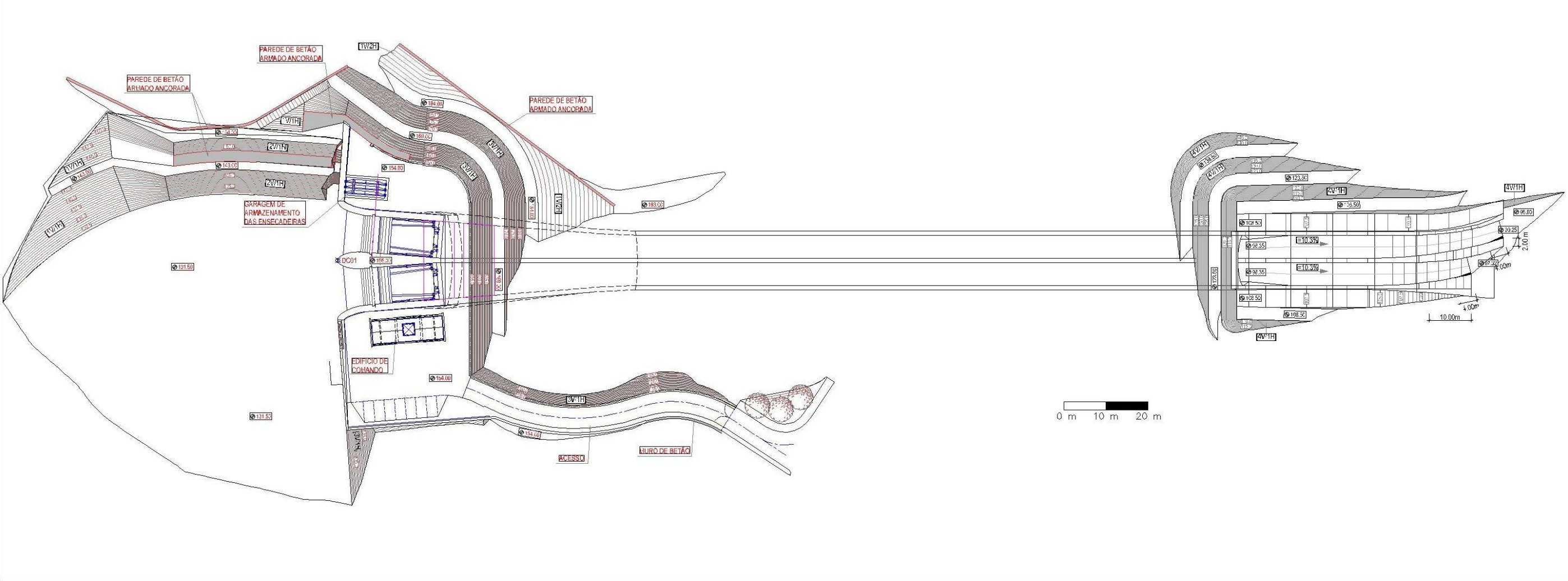
Zhenwei, M. U.; Zhiyan, Z.; Taoa, Z. (2012). *Numerical Simulation of 3-D Flow Field of Spillway based on VOF Method*. 2012 International Conference on Modern Hydraulic Engineering. Procedia Engineering, Volume 28.

Anexo A

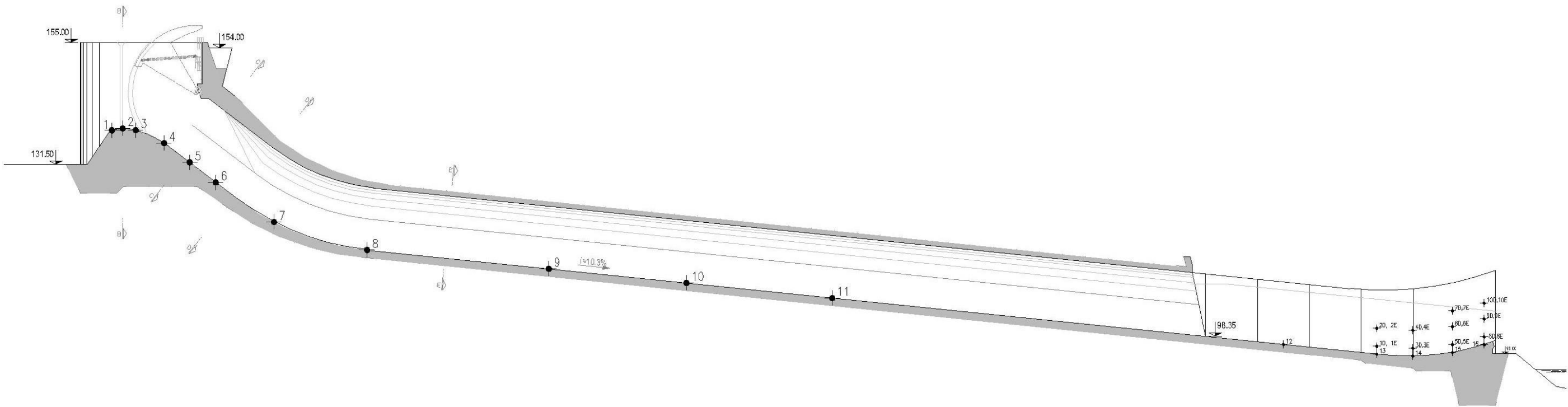
Modelação numérica 3D de escoamentos em descarregadores de cheia.

Aplicação ao descarregador de cheias complementar do aproveitamento hidroelétrico da Caniçada.

A.1 PLANTA GERAL DO DCC DE CANIÇADA

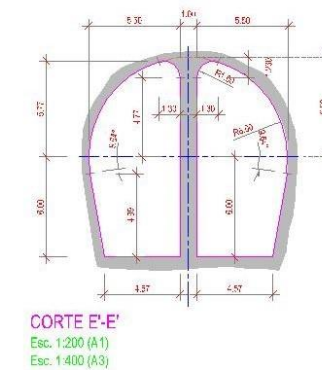
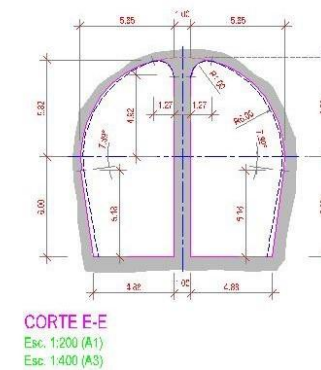
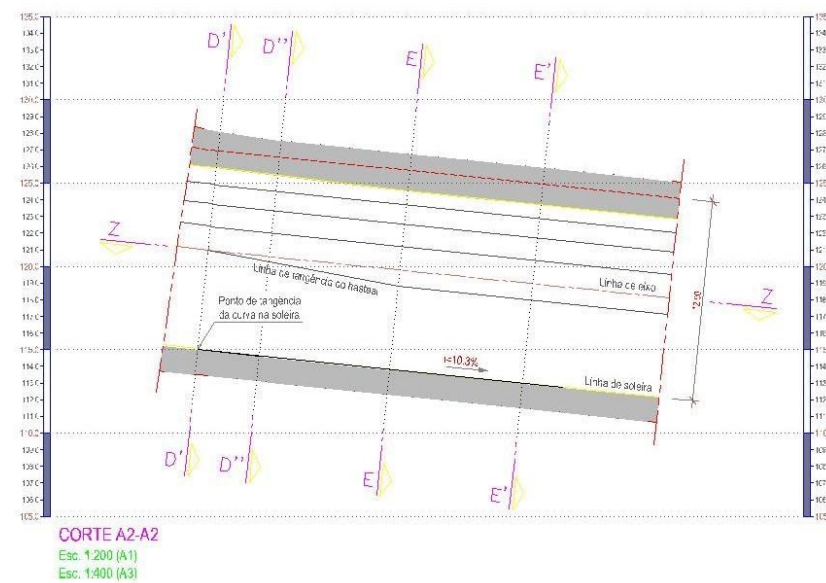
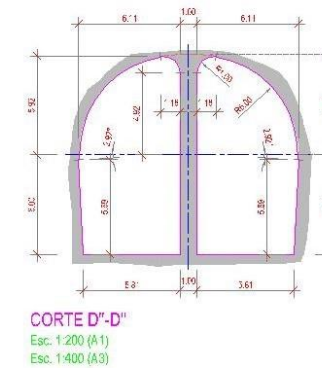
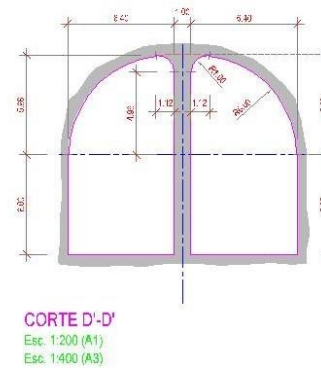
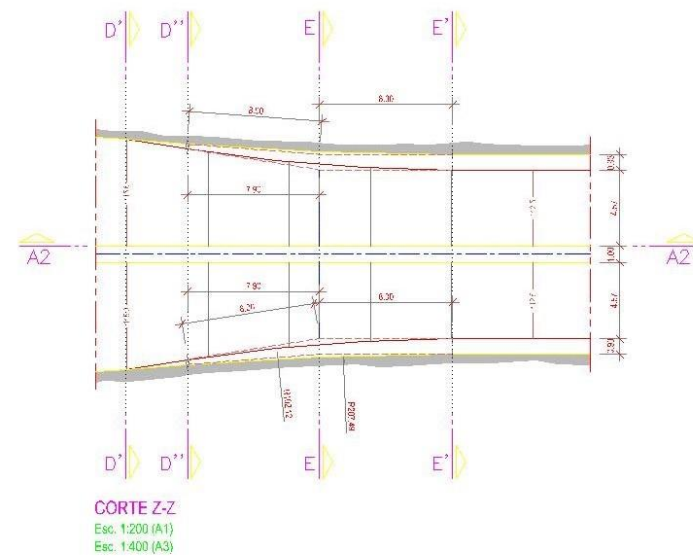


A.2 PERFIL TRANSVERSAL



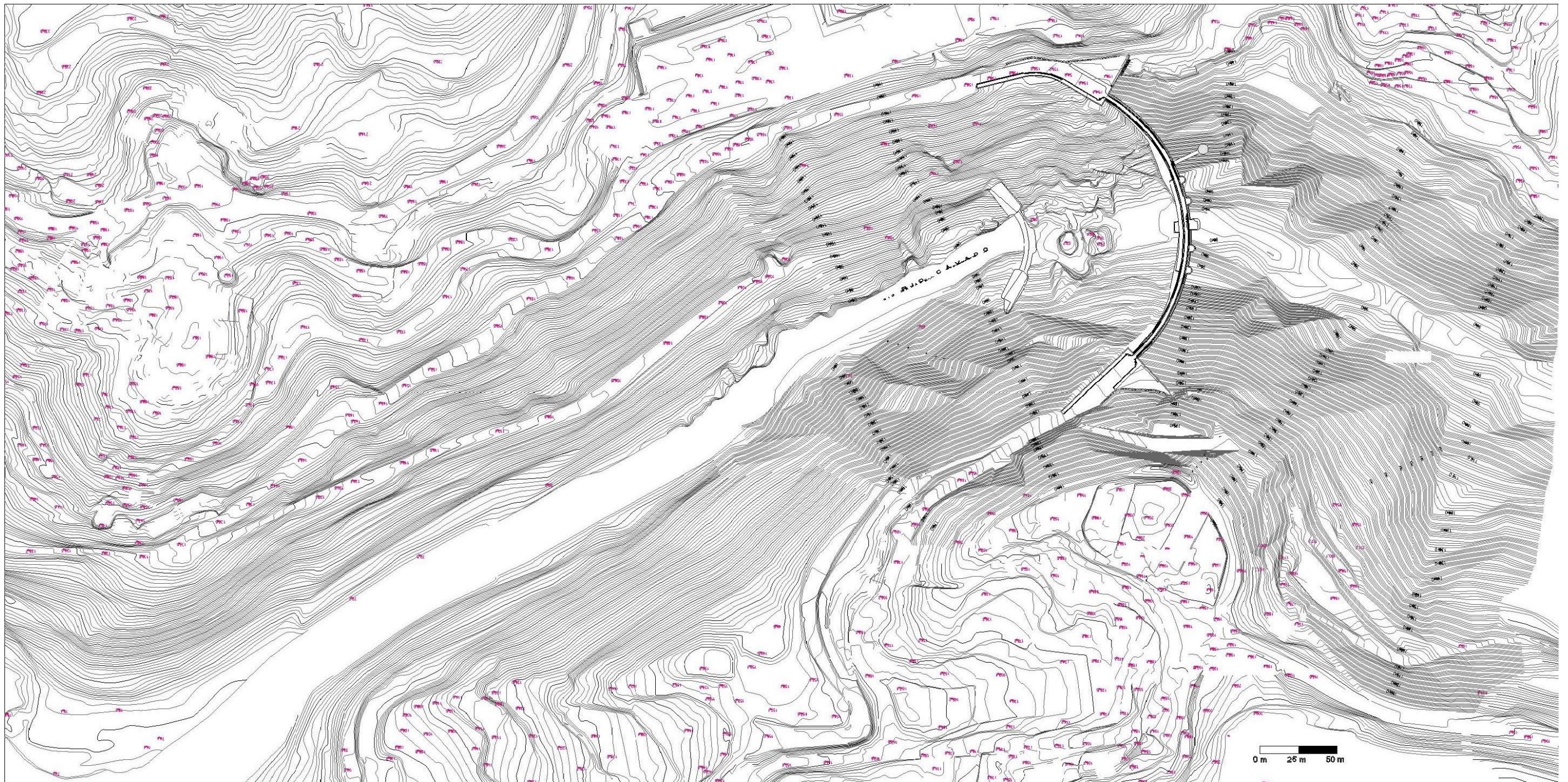


A.4 DESENHO DE PORMENOR DA TRANSIÇÃO CANAL



01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
01	02	03	04	05	06																																																																																														

A.5 PLANTA TOPOGRÁFICA



Modelação numérica 3D de escoamentos em descarregadores de cheia.

Aplicação ao descarregador de cheias complementar do aproveitamento hidroelétrico da Caniçada.

Anexo B

Modelação numérica 3D de escoamentos em descarregadores de cheia.

Aplicação ao descarregador de cheias complementar do aproveitamento hidroelétrico da Caniçada.

B.1 CARACTERÍSTICAS DO MODELO FÍSICO REDUZIDO

B.1.1 CARACTERIZAÇÃO DO MODELO FÍSICO

O projeto do descarregador de cheias complementar de Caniçada foi suportado por um estudo em modelo reduzido que teve por finalidade auferir e estimar os diferentes fenómenos existentes numa estrutura de tão grande complexidade. A realização deste estudo requereu a construção de um modelo físico não distorcido, para o qual foi adotada uma escala geométrica de 1/62 (sendo a escolha da escala condicionada pelo diâmetro normalizado do tubo de acrílico utilizado para a representação da parte superior do túnel). A Figura B1 constitui uma vista geral do modelo físico reduzido. O modelo tem 2,3 m de altura máxima, 13,30 m de comprimento e largura máxima de 6,70 m, na zona respeitante à albufeira. (Muralha e Couto, 2014).



Figura B1 – Modelo hidráulico reduzido, vista de jusante

No modelo físico reduzido foram reproduzidas, para além das estruturas dos descarregadores de cheias, a barragem, uma extensão significativa da albufeira e a zona de jusante que engloba o leito do rio. Esta representação tem por objetivo garantir uma extensão de simulação suficiente para que a reprodução do caso real seja o mais fiável possível no que diz respeito às condições locais de aproximação e restituição dos caudais descarregados pelos diferentes órgãos descarregadores.

Para uma melhor representação das diferentes condições reais a simular foram utilizados diferentes tipos de materiais. As estruturas dos descarregadores de cheias foram moldadas com argamassa de cimento e areia. Nas zonas que posteriormente estarão em contacto com o escoamento, as referidas estruturas apresentam um revestimento de pasta de cimento que tem por objetivo a simulação da rugosidade das superfícies de betão do protótipo.



Figura B2 – Representação no modelo do fundo móvel no leito do rio

No momento da construção do modelo parte do leito do rio foi deixada por preencher. Esta zona corresponde ao fundo do rio na zona de restituição dos caudais e impacto do jato. Posteriormente essa caixa foi posteriormente preenchida com brita, como pode ser observado na Figura B2. A brita simula o material de fundo móvel no leito do rio e permite o estudo do efeito dos jatos de restituição do descarregador de cheias na erosão no leito do rio.

A entrada de água no modelo físico reduzido é efetuada através de um sistema de tranquilização, visível na Figura B3. Os níveis de água no modelo são registados e controlados por dois hidrómetros, um instalado na zona de montante, no interior da albufeira, e outro no trecho de rio a jusante da zona de restituição. Após a análise dos níveis no hidrómetro, os níveis de água são regulados a jusante por uma comporta colocada na fronteira de jusante do modelo e a montante pelo caudal descarregado ou pelo caudal fornecido ao modelo.



Figura B3 – Sistema de tranquilização do modelo hidráulico

No tipo de escoamento em análise no modelo físico reduzido descrito, as forças predominantes são as de inércia e de gravidade. Tendo em conta este facto, dado que o escoamento é parcialmente turbulento e que o número de Reynolds no modelo é suficientemente elevado para garantir que o efeito das forças de viscosidade é desprezável ($Re \geq 10^4$), tem-se que a semelhança dinâmica é satisfeita para uma dada relação geométrica, com base na semelhança de Froude. Partindo desta semelhança, as escalas foram utilizadas neste modelo segundo as correspondentes relações de semelhança. Assim, tendo-se uma escala geométrica $L_r = L_m = 62$, limitada pelo tubo acrílico, a

escala de caudais, dada por uma relação entre o caudal no protótipo e o caudal no modelo, corresponde a $Q_r = L_m^{5/2} = 30267,7$, tal como descrito na Nota Técnica 04/2014 do LNEC.

B.1.2 PONTOS DE MEDIÇÃO DE ALTURAS DE ESCOAMENTO

Na Tabela B1 são visíveis os pontos de medição de alturas de escoamento no modelo numérico, na escala do modelo, sendo as unidades apresentadas em centímetros.

Tabela B1 – Localização dos pontos de medição em cada secção (distâncias no modelo)

Secção	Vão	Distância*(cm)	Secção	Vão	Distância*(cm)	Secção	Vão	Distância*(cm)
1	Esquerdo	0,0	4	Esquerdo	0,0	7	Esquerdo	0,0
		4,0			4,0			4,0
		7,5			7,5			7,5
		12,7			9,0			9,0
	Direito	0,0		Direito	0,0		Direito	0,0
		4,0			4,0			4,0
		7,5			7,5			7,5
		12,7			9,0			9,0
2	Esquerdo	0,0	5	Esquerdo	0,0	8	Esquerdo	0,0
		4,0			4,0			3,0
		7,5			7,5			6,0
		10,5			9,0			8,0
	Direito	0,0		Direito	0,0		Direito	0,0
		4,0			4,0			3,0
		7,5			7,5			6,0
		10,5			9,0			8,0
3	Esquerdo	0,0	6	Esquerdo	0,0	9	Esquerdo	0,0
		4,0			4,0			3,0
		7,5			7,5			5,0
		9,0			9,0			6,5
	Direito	0,0		Direito	0,0		Direito	0,0
		4,0			4,0			3,0
		7,5			7,5			5,0
		9,0			9,0			6,5
*Nota: As distâncias apresentadas são expressas em cm dado que correspondem a comprimentos medidos no modelo físico reduzido.						10	Esquerdo	0,0
								2,0
								4,0
								6,0

B.2 ALTURAS DE ESCOAMENTO PARA AS DIFERENTES SECÇÕES

Secção	Vão	Ponto	Altura (m)	Secção	Vão	Ponto	Altura (m)	Secção	Vão	Ponto	Altura(m)
1	Esquerdo	1	3,4	4	Esquerdo	1	3,5	7	Esquerdo	1	3,9
		2	3,2			2	3,3			2	3,5
		3	2,9			3	3,7			3	2,5
		4	3,1			4	3,9			4	3,9
	Direito	1	3,4		Direito	1	4,0		Direito	1	4,1
		2	2,9			2	3,7			2	3,5
		3	2,5			3	3,4			3	4,0
		4	3,1			4	3,3			4	3,9
2	Esquerdo	1	2,7	5	Esquerdo	1	4,8	8	Esquerdo	1	4,8
		2	2,9			2	3,8			2	3,8
		3	2,7			3	2,8			3	4,0
		4	3,3			4	2,6			4	4,4
	Direito	1	2,6		Direito	1	4,4		Direito	1	3,9
		2	2,9			2	3,1			2	3,8
		3	3,0			3	2,6			3	4,8
		4	3,4			4	3,1			4	5,5
3	Esquerdo	1	4,8	6	Esquerdo	1	4,5	9	Esquerdo	1	7,3
		2	3,2			2	3,4			2	5,0
		3	3,3			3	3,7			3	4,3
		4	3,2			4	3,9			4	4,0
	Direito	1	4,3		Direito	1	4,5		Direito	1	5,3
		2	3,3			2	3,2			2	6,3
		3	3,0			3	3,4			3	6,5
		4	3,1			4	4,0			4	6,7
								10	Esquerdo	1	8,4
										2	7,9
										3	6,4
										4	5,4

Tabela B2 - Alturas de escoamento no modelo físico para o caudal de 896 m³/s

Secção	Vão	Ponto	Altura (m)	Secção	Vão	Ponto	Altura (m)	Secção	Vão	Ponto	Altura(m)		
1	Esquerdo	1	2,0	4	Esquerdo	1	3,0	7	Esquerdo	1	3,2		
		2	1,4			2	2,7			2	2,7		
		3	1,8			3	3,0			3	2,7		
		4	2,0			4	3,0			4	3,2		
	Direito	1	2,7		Direito	1	3,1		Direito	1	2,8		
		2	2,2			2	2,5			2	2,5		
		3	2,0			3	3,2			3	3,1		
		4	2,3			4	3,3			4	3,2		
2	Esquerdo	1	2,1	5	Esquerdo	1	3,5	8	Esquerdo	1	3,4		
		2	2,2			2	3,2			2	3,0		
		3	2,3			3	2,7			3	3,5		
		4	2,4			4	2,1			4	3,5		
	Direito	1	2,5		Direito	1	4,1		Direito	1	2,8		
		2	2,5			2	2,9			2	3,1		
		3	2,7			3	2,7			3	3,7		
		4	2,7			4	2,5			4	4,5		
3	Esquerdo	1	3,8	6	Esquerdo	1	3,3	9	Esquerdo	1	5,9		
		2	2,6			2	2,5			2	4,0		
		3	2,5			3	2,4			3	3,2		
		4	2,4			4	3,0			4	2,5		
	Direito	1	4,3		Direito	1	3,4		Direito	1	3,6		
		2	2,7			2	2,5			2	5,0		
		3	2,5			3	2,5			3	5,1		
		4	2,7			4	3,1			4	5,9		
								10	Esquerdo	1	7,0		
										2	5,8		
										3	4,7		
										4	3,9		

Tabela B3 - Alturas de escoamento no modelo numérico para o caudal de 690 m³/s

Secção	Vão	Ponto	Altura (m)	Secção	Vão	Ponto	Altura (m)	Secção	Vão	Ponto	Altura(m)		
1	Esquerdo	1	2,2	4	Esquerdo	1	2,5	7	Esquerdo	1	2,5		
		2	1,4			2	2,1			2	2,2		
		3	1,4			3	2,5			3	2,4		
		4	2,0			4	2,5			4	2,7		
	Direito	1	2,3		Direito	1	2,5		Direito	1	2,0		
		2	1,7			2	2,4			2	2,1		
		3	1,4			3	2,4			3	2,4		
		4	2,2			4	2,7			4	2,8		
2	Esquerdo	1	1,9	5	Esquerdo	1	3,2	8	Esquerdo	1	2,9		
		2	1,6			2	2,4			2	2,5		
		3	1,8			3	2,0			3	2,8		
		4	2,0			4	1,6			4	3,0		
	Direito	1	2,0		Direito	1	3,3		Direito	1	2,5		
		2	1,9			2	1,9			2	2,2		
		3	2,0			3	1,5			3	2,5		
		4	2,3			4	1,7			4	2,7		
3	Esquerdo	1	3,5	6	Esquerdo	1	3,0	9	Esquerdo	1	5,1		
		2	2,6			2	2,4			2	3,7		
		3	1,9			3	2,2			3	2,4		
		4	2,0			4	2,3			4	2,5		
	Direito	1	3,7		Direito	1	2,7		Direito	1	3,3		
		2	2,2			2	2,0			2	4,5		
		3	1,9			3	2,2			3	4,5		
		4	2,2			4	2,5			4	5,0		
								10	Esquerdo	1	6,1		
										2	4,8		
										3	4,0		
										4	3,2		

Tabela B4 - Alturas de escoamento no modelo numérico para o caudal de 527 m³/s

Secção	Vão	Ponto	Altura (m)	Secção	Vão	Ponto	Altura (m)	Secção	Vão	Ponto	Altura(m)		
Secção 1	Esquerdo	1	1,0	Secção 4	Esquerdo	1	1,7	Secção 7	Esquerdo	1	1,7		
		2	0,9			2	1,4			2	1,2		
		3	0,7			3	1,6			3	1,5		
		4	1,2			4	1,7			4	1,6		
	Direito	1	1,4		Direito	1	1,6		Direito	1	1,4		
		2	0,9			2	1,4			2	1,2		
		3	0,9			3	1,6			3	1,6		
		4	1,4			4	1,7			4	1,9		
Secção 2	Esquerdo	1	1,0	Secção 5	Esquerdo	1	2,2	Secção 8	Esquerdo	1	2,0		
		2	1,1			2	1,4			2	1,6		
		3	0,9			3	1,1			3	1,5		
		4	1,2			4	1,2			4	1,9		
	Direito	1	1,1		Direito	1	2,0		Direito	1	1,2		
		2	1,1			2	1,4			2	1,4		
		3	1,2			3	1,0			3	1,7		
		4	1,4			4	0,9			4	2,5		
Secção 3	Esquerdo	1	2,4	Secção 6	Esquerdo	1	2,0	Secção 9	Esquerdo	1	3,5		
		2	1,2			2	1,1			2	1,4		
		3	1,1			3	1,2			3	1,1		
		4	1,4			4	1,6			4	1,4		
	Direito	1	2,7		Direito	1	1,6		Direito	1	1,7		
		2	1,4			2	1,4			2	3,0		
		3	1,2			3	1,4			3	3,2		
		4	1,3			4	1,6			4	3,6		
								Secção 10	Esquerdo	1	4,5		
										2	3,5		
										3	3,1		
										4	1,8		

Tabela B5 - Alturas de escoamento no modelo numérico para o caudal de 303 m³/s

B.3 MEDIÇÃO DE VELOCIDADES

O equipamento que possibilita a medição de velocidades é no molinete, visível na Figura B9. Este equipamento é constituído por uma hélice, um braço e um instrumento de contagem de rotações da hélice. Após registo das rotações efetuadas num minuto pela hélice, é estimada a velocidade do escoamento com recurso a uma fórmula fornecida pelo fabricante, no presente caso a OTT, e calibrada de acordo com a hélice através do manual do instrumento «Current Meter C2 "10.150"», de 1988 (Muralha *et al.*, 2014).



Figura B9 – Molinete utilizado para a medição de velocidades (Muralha *et al.*, 2014).

Foram utilizadas duas hélices em função da gama de velocidades do escoamento. As hélices usadas são as apresentadas na Figura B10, sendo a hélice nº 4 a que está visível do lado esquerdo e a nº 5 a do lado direito.



Figura B10 – Hélices utilizadas no molinete (Muralha *et al.*, 2014).

As cotas a que foram efetuadas as medições, em cada um dos vãos, foram escolhidas, como referido no presente documento, na fase de realização dos ensaios. O procedimento foi realizado de forma iterativa para que esse ponto se situasse a meio da secção e a meia altura de escoamento.

Anexo C

Modelação numérica 3D de escoamentos em descarregadores de cheia.

Aplicação ao descarregador de cheias complementar do aproveitamento hidroelétrico da Caniçada.

C.1 ALTURA DE ÁGUA NA ZONA DE APROXIMAÇÃO SEGUNDO A USACE

Para a consideração da influência destes parâmetros o *United States Department of the Interior* apresenta uma formulação baseada em estudos empíricos que nos permite estimar a influência dos respetivos parâmetros. É utilizada então uma metodologia baseada em ábacos, equações e gráficos e que é apresentada de seguida.

De salientar que o referido volume utiliza o sistema de unidades inglês pelo que os valores a introduzir nas equações serão inseridos em pés (feet), exceção feita para ábacos e/ou equações adimensionais.

Como referido, a altura de dimensionamento (H_d) é de 12,5 m, sendo a relação $H/H_d=1,17$ e consequentemente o nível de água a montante (H) de 14,625. A altura da crista da soleira descarregadora (P – de acordo com a nomenclatura da Figura C1) é de 20m, sendo esta uma definição do modelo geométrico.

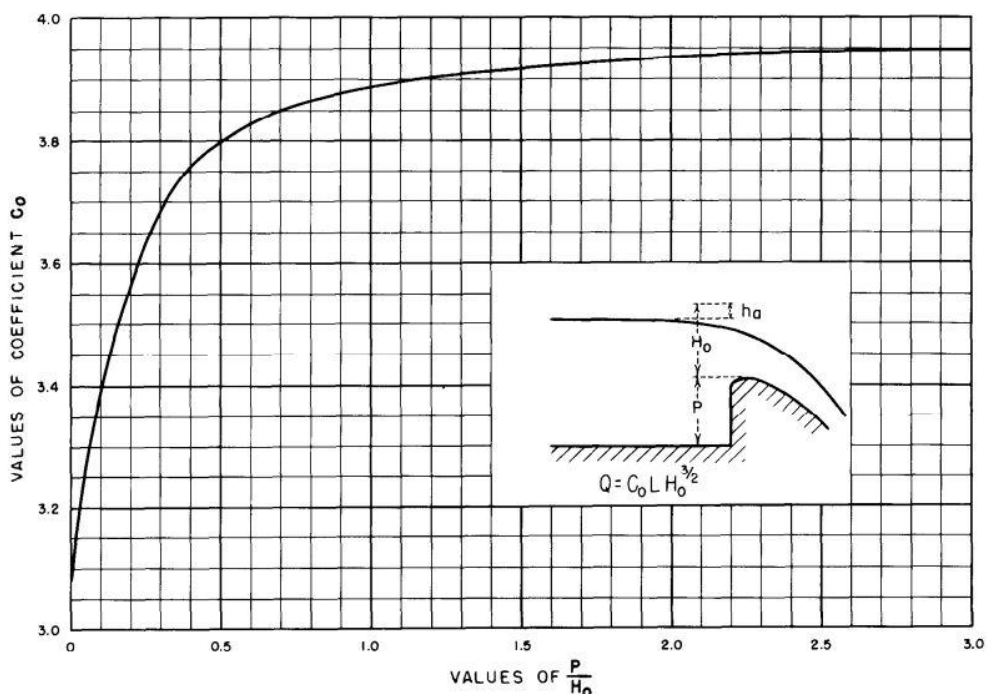


Figura C1 – Coeficiente C_0

Pelo ábaco da Figura C1 e considerando a relação $P/H_0=1,6$ obtém-se um coeficiente $C_0=3,92$. Este coeficiente tem em conta os efeitos da cota dos fundos.

Após a definição do coeficiente C_0 é necessário estabelecer o coeficiente C , que tem em conta a influência de H/H_d , ou seja, pondera a influência no escoamento da relação altura de dimensionamento e altura efetiva. Sendo $H/H_d=1,17$ (H_e/H_0 na terminologia do livro usado), tem-se que, pelo ábaco da Figura C2, $C/C_0=1,02$. Pelo que $C=3,9984$.

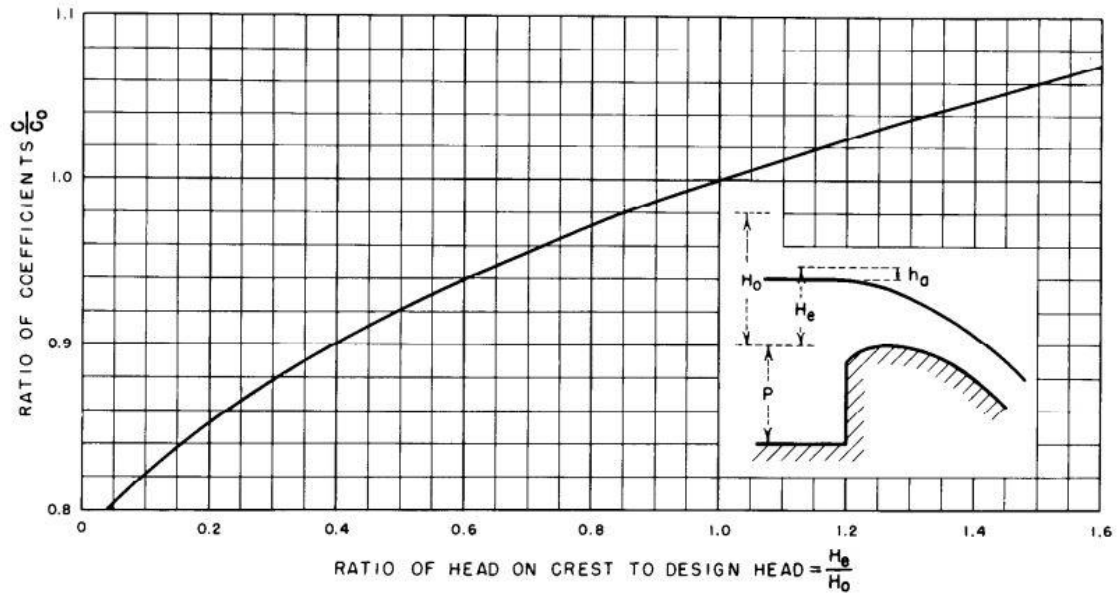


Figura C2 – Relação C/C_0

Após a determinação de C , pelas equações enunciadas na Figura C3, é possível calcular o valor final de h_a , sendo este o valor efetivo do nível de água.

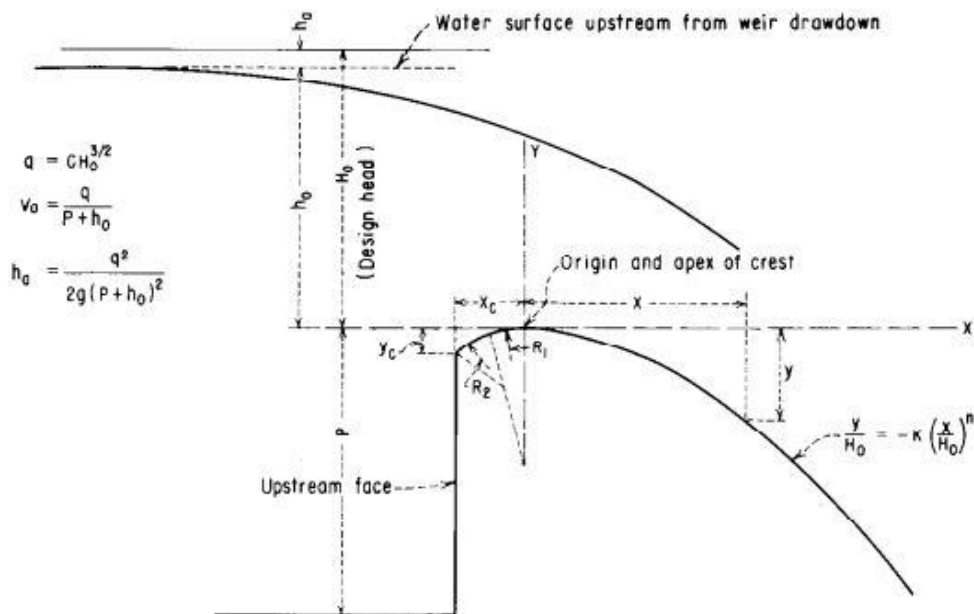


Figura C3 – Equações de cálculo da altura efetiva e configuração do caso de estudo

O valor de ' q ' é possível de obter através do coeficiente C e de H_0 (valor é pés). Após o cálculo de ' q ', recorre-se à equação de h_a , dependente de h_0 . Sendo que, como é possível observar pela Figura C3, $h_0 = H_0 - h_a$. Através desta semelhança, obtém-se uma equação a uma incógnita. Após o cálculo e a conversão dos valores em pés para metros, obtém-se o valor de 0,675 m para h_a , pelo que o nível de água a montante após a consideração dos efeitos de aproximação se situa nos 13,95m em relação à cota da crista do descarregador.

C.2 VALORES DE PRESSÃO OBTIDOS NOS TESTES DE SENSIBILIDADES

Tabela C1 – Soleira Normal com Paramento Vertical: Pontos de medição de pressão

X	Y	Z	X	Y	Z
-3,50	0,5	-1,565	6,00	0,5	-1,608
-3,00	0,5	-0,893	6,50	0,5	-1,864
-2,50	0,5	-0,537	7,00	0,5	-2,138
-2,00	0,5	-0,329	7,50	0,5	-2,429
-1,50	0,5	-0,183	8,00	0,5	-2,737
-1,00	0,5	-0,081	8,50	0,5	-3,062
-0,50	0,5	-0,020	9,00	0,5	-3,404
0,00	0,5	0,000	9,50	0,5	-3,762
0,50	0,5	-0,016	10,00	0,5	-4,136
1,00	0,5	-0,058	10,50	0,5	-4,527
1,50	0,5	-0,124	11,00	0,5	-4,934
2,00	0,5	-0,211	11,50	0,5	-5,357
2,50	0,5	-0,318	12,00	0,5	-5,795
3,00	0,5	-0,446	12,50	0,5	-6,250
3,50	0,5	-0,593	13,00	0,5	-6,720
4,00	0,5	-0,759	13,50	0,5	-7,206
4,50	0,5	-0,944	14,00	0,5	-7,708
5,00	0,5	-1,147	14,50	0,5	-8,225
5,50	0,5	-1,369	15,00	0,5	-8,757

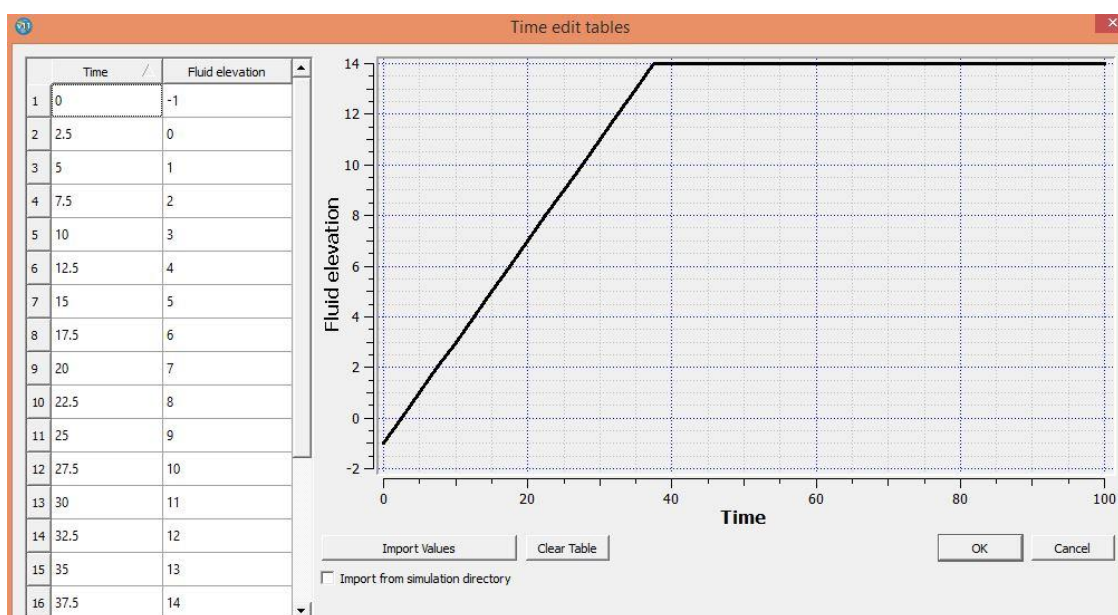


Figura C4 – Evolução da altura de água na entrada ao longo do tempo

Tabela C2 – Soleira Normal com paramento inclinado: Coordenadas das tomadas de pressão no descarregador

Coordenadas		
X	Y	Z
-2,051	0,5	-0,406
0	0,5	0
2,542	0,5	-0,36
7,998	0,5	-2,873

Tabela C3 – Soleira normal com paramento vertical: Pressões obtidas para modelo sem mistura de ar

Bloco 1		Bloco 2		Bloco 3	
X/Hd	hp/Hd	X/Hd	hp/Hd	X/Hd	hp/Hd
-2,80E-01	-3,39E-02	3,20E-01	-6,67E-02	-2,80E-01	-1,81E-01
-1,60E-01	-4,89E-02	3,60E-01	-5,97E-02	-2,40E-01	-4,24E-03
-1,20E-01	-8,01E-02	4,00E-01	8,31E-04	-2,00E-01	-4,39E-02
-8,00E-02	-7,30E-02	4,40E-01	-7,72E-02	-1,60E-01	-6,13E-02
-4,00E-02	-1,77E-01	4,80E-01	-5,76E-02	-1,20E-01	-1,52E-01
0,00E+00	-2,41E-01	5,20E-01	-7,16E-02	-8,00E-02	-8,02E-02
4,00E-02	-3,52E-02	5,60E-01	-9,85E-03	-4,00E-02	-2,27E-01
8,00E-02	-5,09E-02	6,00E-01	-6,73E-03	0,00E+00	-4,04E-01
1,20E-01	-4,16E-03	6,40E-01	-9,02E-02	4,00E-02	2,42E-02
1,60E-01	-6,38E-02	6,80E-01	-3,31E-02	8,00E-02	-4,30E-02
2,00E-01	-4,36E-02	7,20E-01	-4,25E-04	1,20E-01	4,39E-03
3,20E-01	-5,00E-02	7,60E-01	-4,97E-04	1,60E-01	-5,68E-02
1,12E+00	6,43E-02	8,00E-01	-1,01E-01	2,00E-01	-4,18E-02
1,16E+00	8,19E-02	8,40E-01	-6,56E-02	2,40E-01	-6,19E-02
1,20E+00	7,99E-02	8,80E-01	7,88E-03	2,78E-01	-9,17E-02
		9,20E-01	-4,48E-02		
		1,00E+00	4,71E-02		
		1,04E+00	8,60E-03		
		1,08E+00	2,88E-02		
		1,12E+00	6,62E-02		

Tabela C4 – Resultados de pressão para simulação com equações de 1ª ordem

Modelo Numérico						Modelo Físico		
Text Output		Neutral File				Coordenadas		m.c.a.
Coordenadas de extração		Pa	m.c.a.	Pa	m.c.a.			
x	z					x	z	
-2,0506024	-0,40666461	-1365,58	-0,14	-1,21E+03	-0,12	-2,051	-0,406	0,72
-0,00257908	0,0008882	-38543,55	-3,93	-3,85E+04	-3,93	0	0	0,06
2,5449624	-0,35572049	-8872,67	-0,90	-8,87E+03	-0,90	2,542	-0,36	-1,13
7,9897079	-2,8519812	-2623,48	-0,27	-2,62E+03	-0,27	7,998	-2,873	0,21

Tabela C5 – Valores de pressão para a simulação com malha refinada

Modelo Numérico						Modelo Físico		
Text Output				Neutral File		Coordenadas		m.c.a.
Coordenadas de extração		Pa	m.c.a.	Pa	m.c.a.			
x	z					x	z	
-2,063091	-0,419401	-1534,05	-0,16	-3,67E+03	-0,37	-2,051	-0,406	0,72
0,009909	-0,011848	-50537,45	-5,15	-4,03E+04	-4,11	0	0	0,06
2,532475	-0,368457	-8060,95	-0,82	-7,94E+03	-0,81	2,542	-0,36	-1,13
7,9772196	-2,8647175	-2,49E+03	-0,25	-2,82E+03	-0,29	7,998	-2,873	0,21

Tabela C6 – Resultados de pressão relativos a modelo sem emulsão de ar

Modelo Numérico						Modelo Físico		
Text Output				Neutral File		Coordenadas m.c.a.		
Coordenadas de extração		Pa	m.c.a.	Pa	m.c.a.			
x	z					x	z	
-2,05E+00	-4,07E-01	-2356,29	-0,24	-2407,51	-0,25	-2,051	-0,406	0,72
-2,58E-03	8,88E-04	-39605,58	-4,04	-39558,84	-4,03	0	0	0,06
2,54E+00	-3,56E-01	-9376,77	-0,96	-9376,31	-0,96	2,542	-0,36	-1,13
7,99E+00	-2,90E+00	-5683,47	-0,58	-2649,97	-0,27	7,998	-2,873	0,21

Tabela C7 – Valores de pressão para simulação com velocidade inicial

Modelo Numérico						Modelo Físico		
Text Output			Neutral File					
Coordenadas de extração		Pa	m.c.a.	Pa	m.c.a.	Coordenadas		m.c.a.
x	z					x	z	
-2,0230293	-0,45	-117266	-11,96	-116270	-11,86	-2,051	-0,406	0,72
-0,0169652	-0,05	-108269	-11,04	-100242	-10,22	0	0	0,06
2,5909181	-0,35	-39724,4	-4,05	-39932,3	-4,07	2,542	-0,36	-1,13
8,0072908	-2,95	-18292,2	-1,87	-15027,8	-1,53	7,998	-2,873	0,21

Tabela C8 – Valores de pressão para modelo com caudal inicial

Modelo Numérico						Modelo Físico		
Text Output			Neutral File			Coordenadas m.c.a.		
Coordenadas de extração		Pa	m.c.a.	Pa	m.c.a.			
x	z					x	z	
-2,0230293	-0,45	-5580,42	-0,57	-5536,02	-0,56	-2,051	-0,406	0,72
-0,0169652	-0,05	-33370,6	-3,40	-30212,3	-3,08	0	0	0,06
2,5909181	-0,35	-10430	-1,06	-10400,5	-1,06	2,542	-0,36	-1,13
8,0072908	-2,95	184,8705	0,02	1667,968	0,17	7,998	-2,873	0,21

Tabela C9 – Valores de pressão para o modelo numérico com domínio reduzido e caudal fixo

Modelo Numérico						Modelo Físico		
Text Output			Neutral File			Coordenadas		m.c.a.
Coordenadas de extração		Pa	m.c.a.	Pa	m.c.a.			
x	z					x	z	
-2,0230293	-0,45	-7529,81	-0,77	-7449,91	-0,76	-2,051	-0,406	0,72
-0,0169652	-0,05	-37165,9	-3,79	-33738,9	-3,44	0	0	0,06
2,5909181	-0,35	-13349	-1,36	-13320,1	-1,36	2,542	-0,36	-1,13
8,0072908	-2,95	-2611,67	-0,27	-983,565	-0,10	7,998	-2,873	0,21

Tabela C10 – Valores de pressão para modelo com ponto fixo de entrada e domínio reduzido

Modelo Numérico						Modelo Físico		
Text Output			Neutral File			Coordenadas		
Coordenadas de extração		Pa	m.c.a.	Pa	m.c.a.			m.c.a.
x	z					x	z	
-2,0230293	-0,45	-17605,8	-1,80	-17520,9	-1,79	-2,051	-0,406	0,72
-0,0169652	-0,05	-41228,2	-4,20	-37918,8	-3,87	0	0	0,06
2,5909181	-0,35	-13940,1	-1,42	-13964,8	-1,42	2,542	-0,36	-1,13
8,0072908	-2,95	716,2994	0,07	2076,758	0,21	7,998	-2,873	0,21

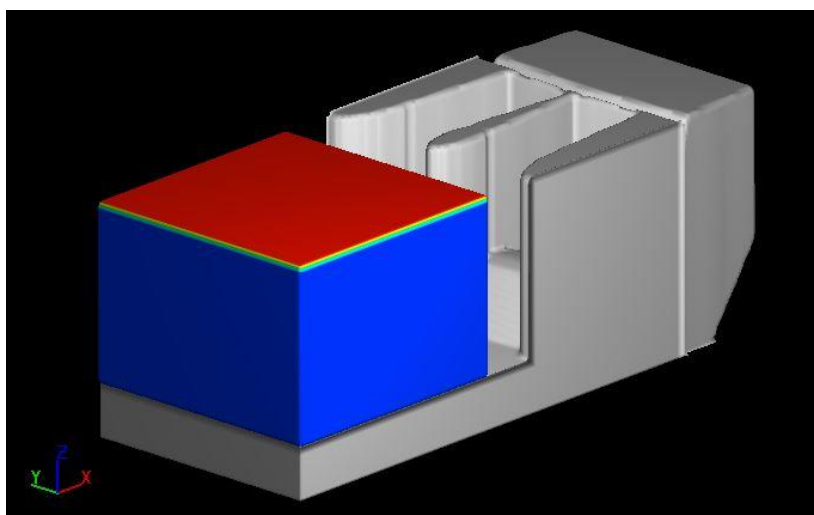


Figura C5 – Condição inicial para modelo de sensibilidade 3D

C.3 CONSIDERAÇÕES DO MODELO NUMÉRICO

Neste ponto são indicadas as opções numéricas tomadas para o cálculo do modelo numérico de forma mais detalhada e como complemento ao descrito no ponto 5.5 do capítulo 5 da presente dissertação.

C.3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Para dar início à construção de um modelo numérico é necessário definir as condições gerais do modelo. Nesta primeira fase da construção do modelo numérico é definido o tempo total de simulação, o tipo de interface do escoamento, o modo de escoamento, o número de fluidos existentes no domínio e a ter em consideração na simulação, o sistema de unidades a utilizar, as unidades a utilizar para as temperaturas, o tipo de precisão utilizado bem como o número de processadores a integrar no processo.

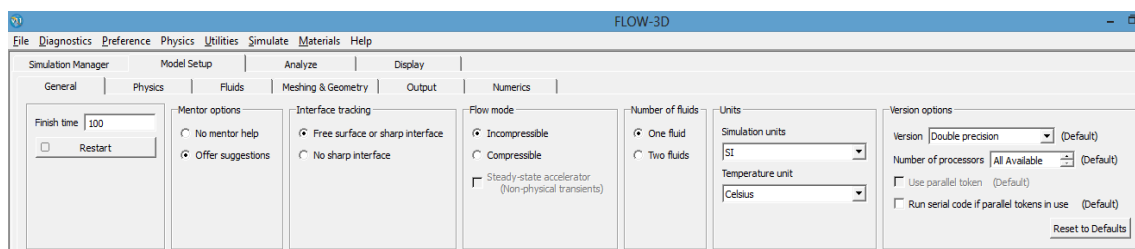


Figura C6 – Condições iniciais Flow 3D

O tempo de simulação adotado no modelo numérico é de 100 s. As condições de escoamento, tal qual as presentes no caso de estudo, são de superfície livre. O fluido incompressível, dado que o fluido do caso em estudo é a água. Foi apenas considerado um fluido. Todas as unidades do programa estão representadas nas unidades do sistema internacional (SI) e a temperatura é representada em graus Celcius. As opções tidas em conta no modelo numérico podem ser visualizadas estas condições iniciais na Figura C6.

C.3.2 CONSIDERAÇÕES FÍSICAS

Em termos físicos é necessário definir quais as grandezas físicas a considerar no cálculo e consequentemente as grandezas físicas que terão influência sob o escoamento. Nesta fase é imperativo, tal como explicado no capítulo 2 do presente documento, ponderar de forma especial a definição das grandezas físicas envolvidas. Se, por um lado, a integração de mais grandezas físicas conduzem a resultados mais precisos e pondera um maior número de fatores, por outro, há que ter em consideração que essa integração poderá ter uma consequência importante sobre o tempo de cálculo do modelo. Como tal, é necessário que a escolha incida apenas nas grandezas físicas estritamente necessárias e que têm realmente influência no escoamento. A escolha de outras grandezas poderá afetar a precisão dos resultados numa escala diminuta ou mesmo nula e ter como consequência o aumento do tempo de cálculo.

No atual modelo numérico as grandezas físicas consideradas são três: forças gravíticas; emulsão de ar; e viscosidade e turbulência. A consideração destas grandezas físicas têm em consideração os testes de sensibilidade descritos no capítulo 5 da presente dissertação. A aceleração gravítica é a força mais importante e influente no escoamento, sendo adotado o valor de $9,8065 \text{ m/s}^2$ para a aceleração gravítica, no sentido negativo do eixo Z. Foi também escolhida a integração de fenómenos de viscosidade e turbulência no caso de estudo, com cálculo através do modelo de turbulência RNG. A escolha da adoção deste modelo tem como fundamento o tipo

de escoamento existente no descarregador e que havia sido observado *a priori* em modelo físico. O escoamento apresenta alguma turbulência, principalmente na zona de contacto do jato com o rio. A existência de pequenos vórtices na secção de entrada e turbulência na zona de contacto do jato com o rio constitui argumento para a consideração de emulsão de ar no modelo numérico. Foi considerado para o cálculo do emulsão de ar um coeficiente de mistura de 0,5, uma tensão superficial de 73 N/m.

C.3.3 CONSIDERAÇÕES DE FLUIDOS

Um ponto importante na construção de uma simulação numérica é a definição do fluido envolvido na simulação e das suas características. O Flow 3D já contempla uma base de dados com diferentes fluidos, os quais o utilizador pode escolher e/ou personalizar. Tendo já o *software* o fluido “água” criado, com as diferentes características físicas e químicas já pré-estabelecidas, foi associado esse fluido às simulações numéricas do caso de estudo.

O fluido é caracterizado por uma densidade de 1000 N/m^3 e uma viscosidade cinemática de $0.001 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Em termos de propriedades térmicas o fluido caracteriza-se por um calor específico de 4182 J, condutividade térmica igual a 0.597 W/m.K a 0°C . A solidificação do fluido utilizado ocorre a 0.1°C na fase líquida, 0°C a liquefação em fase sólida e $3,35 \cdot 10^5 \text{ J/kg}$ o calor latente de fusão.

C.3.4 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DO MODELO NUMÉRICO

A construção do modelo numérico constitui uma fase crítica na definição de um modelo numérico, mais ainda quando a estrutura estudada apresenta uma configuração de elevada complexidade. A descrição da fase de construção do modelo geométrico é apresentado no Anexo D.1. No referido anexo são descritos todos os passos respeitantes à definição do modelo geométrico bem como a verificação da correspondência entre o modelo geométrico ao modelo físico reduzido. Na Figura C7 é possível observar o alçado final do modelo geométrico. São também visíveis na figura as linhas que ligam a origem à posição das tomadas de pressão em modelo físico e que constituem o processo utilizado para a verificação da correção da configuração geométrica desenvolvida.

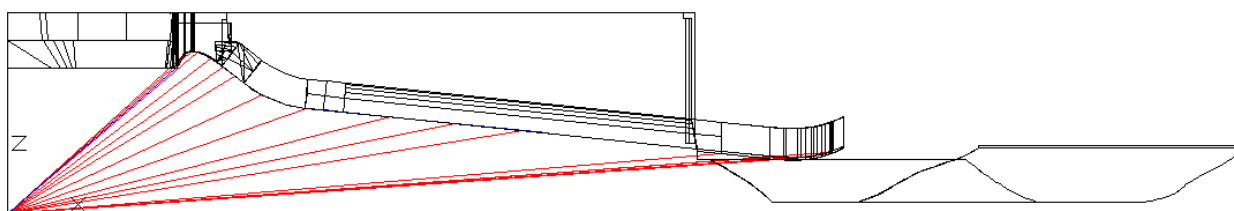


Figura C7 - Configuração geométrica final, alçado

O modelo computacional Flow 3D permite que a definição da geometria seja feita através da *interface* do próprio programa, através da utilização de formas geométricas simples. Permite também que seja importado um objeto sólido em formato “.stl” (*Lithography*). Sendo o caso de estudo de uma grande complexidade geométrica, optou-se pela integração do modelo através desse formato dado que a integração através da *interface* do Flow 3D era difícil ou mesmo

impossível tendo em consideração a geometria e características do descarregador, zona de aproximação e configuração do leito do rio.

Para a construção do modelo geométrico recorreu-se, como descrito no Anexo D.1, ao programa de desenho AutoCad 3D da AutoDesk. A construção do modelo foi uma fase de grande complexidade e que requereu muito tempo. Os valores e configurações das diferentes partes do descarregador foram obtidos através de diferentes cortes e plantas da configuração final do descarregador. Houve também recurso a uma planta topográfica da região por forma a reunir a informação respeitante à litografia do rio e condições de aproximação à entrada do descarregador.

De referir ainda que o Flow 3D impõe que o domínio computacional tenha a configuração de um paralelepípedo ou de uma esfera, tendo-se adotado, no presente caso, um domínio computacional de forma paralelepipedica.

A configuração geométrica final, obtida em AutoCad 3D, é a apresentada na Figura C8. Como pode ser observado na referida figura, o domínio computacional encontra-se confinado por um paralelepípedo, sendo que existe uma parte sólida que engloba a quase totalidade da estrutura e que representa o terreno natural. Nessa zona encontra-se apenas inserida o interior do túnel do descarregador. Nas zonas em canal, não existe, como é natural sólido. O paralelepípedo referente ao domínio tem dimensões (nas coordenadas da Figura) 525x125x83m.

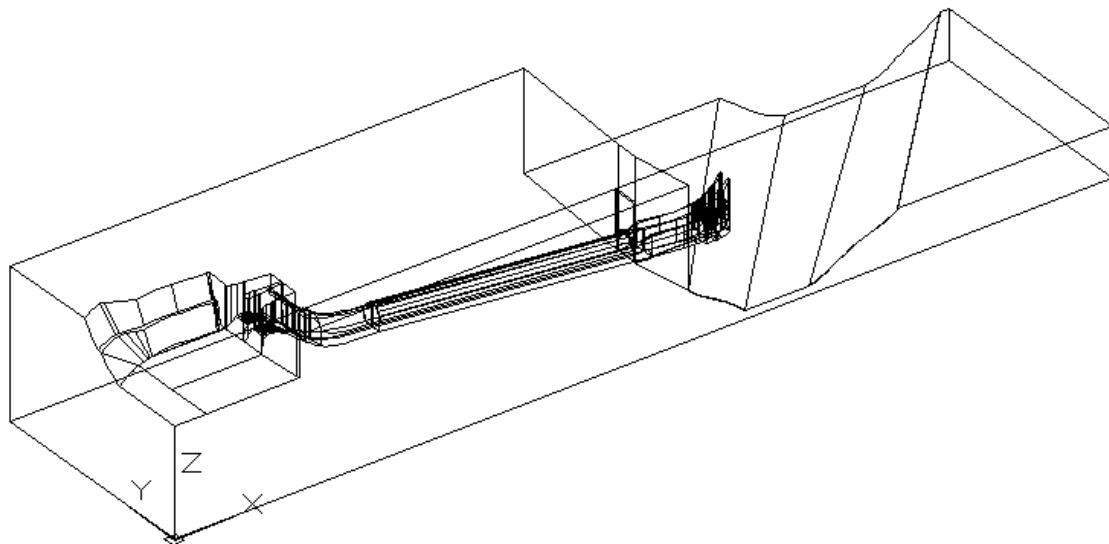


Figura C8 – Configuração final do Modelo Geométrico do caso de estudo em AutoCad 3D

Com o objetivo de diminuir o número total de células de cálculo no modelo numérico, foram retiradas ao espaço total do domínio computacional algumas frações de domínio. Estas frações do domínio removidas correspondem a zonas em que o cálculo era dispensável por não existir escoamento. Este processo tem o nome de remoção do domínio computacional.

Essas frações de domínio computacional a remover foram definidas com base num sólido previamente construído. Esse sólido de remoção de domínio foi construído através do *software* AutoCad 3D e tem como condição de definição a garantia em todo o domínio computacional de uma distância mínima de 2 metros até regiões com presença de escoamento. O sólido utilizado para remoção do domínio computacional pode ser observado a cor magenta na Figura C9. É possível observar também a garantia da distância mínima nas diferentes partes do descarregador.

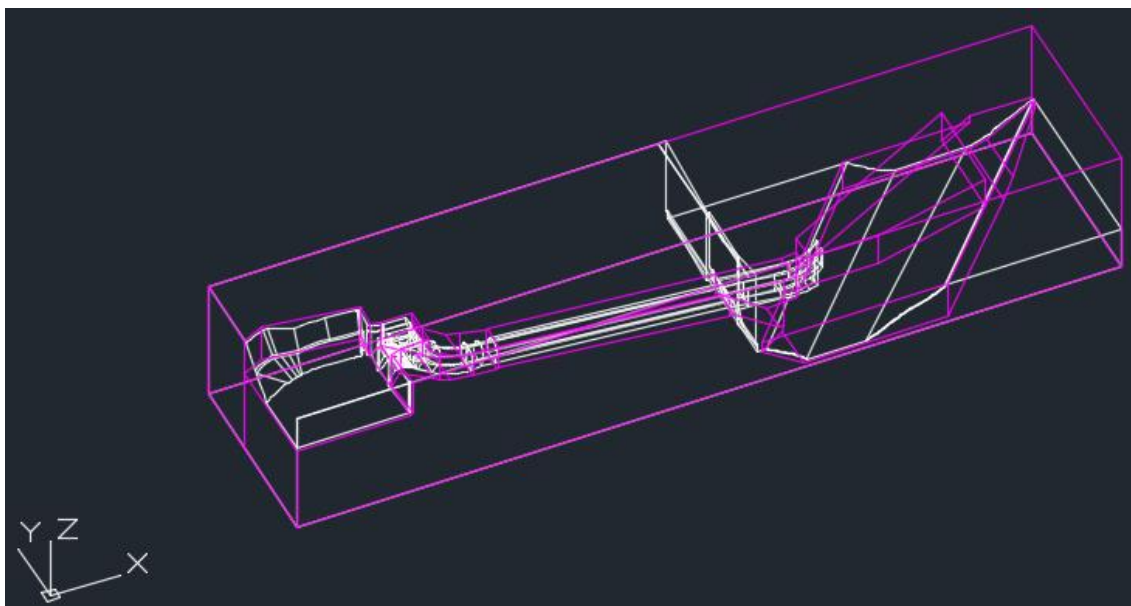


Figura C9 – Sólido de remoção do domínio computacional

C.3.5 MALHA DE CÁLCULO

A definição da malha de cálculo, como já referido anteriormente, é uma fase preponderante na construção de um modelo numérico. A dimensão da célula de cálculo influencia de forma direta a precisão de cálculo e o tempo de cálculo do modelo, sendo portanto, uma escolha que deverá criar um compromisso entre a precisão requerida e o tempo de cálculo total. A malha utilizada é de coordenadas cartesianas, deferindo o espaçamento da célula em diferentes partes do modelo. Esta não regularidade da dimensão de célula está relacionada com a complexidade geométrica do modelo. Existindo secções do domínio que contêm secções curvas e/ou variações bruscas, estas secções requerem um menor espaçamento de malha por forma a representar de forma mais fidedigna a geometria original.

A necessidade de refinamento da malha por razões geométricas encontra-se fundamentada no ponto 5.1. do presente documento. Além dessa necessidade apenas em zonas críticas, a dimensão de célula pode tomar valores maiores em zonas de aproximação. Estas zonas de aproximação não serão alvo de estudo pormenorizado, sendo maior a dimensão de malha admissível para o cálculo numérico. Numa primeira fase do estudo, e por uma questão de diminuição do tempo de cálculo, não foi considerado salto final e a simulação do rio, sendo o estudo cingido apenas ao DCC. O domínio máximo utilizado nas primeiras simulações, tem as dimensões de 350, 119 e 83 metros segundo X, Y e Z, respetivamente.

Na Figura C10 pode ser observada a configuração da malha de cálculo utilizada no modelo numérico. É possível observar na referida figura que todo o modelo geométrico se encontra representado no Flow 3D, sendo que o domínio computacional e de cálculo não abrange a totalidade do modelo geométrico fornecido ao programa.

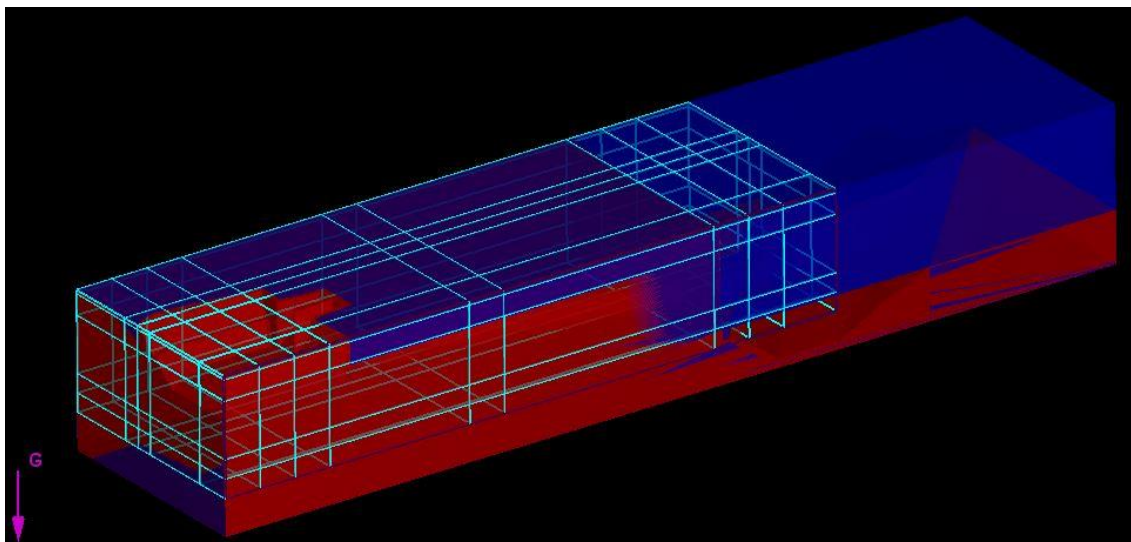


Figura C10 – Configuração da malha de cálculo utilizada

O número total de células do domínio computacional é de 12 310 707 células, sendo que após retirar as células correspondentes ao sólido do descarregador de cheias e considerada a remoção do domínio, o número total de células a simular é de 168.139. Na simulação, o espaçamento mínimo utilizado para a construção da malha é de 0,5m, correspondente às zonas do domínio com maior necessidade de precisão. Das referidas zonas com uma necessidade maior de precisão constam a estrutura de entrada e a estrutura terminal do descarregador. Podem ser observadas na Tabela C11, as características da malha de cálculo utilizada.

Tabela C11 – Malha de cálculo utilizada no modelo 3D

Coordenada - direção X	0	20	40	60	140	160	280	300	320	350	Total
Número de células		20	25	33	160	33	171	33	40	50	565
Espaçamento da malha		1,00	0,80	0,61	0,50	0,61	0,70	0,61	0,50	0,60	

Coordenada - direção Y	0	20	60	70	80	119	Total
Número de células		33	80	17	13	39	182
Espaçamento da malha		0,61	0,50	0,59	0,77	1,00	

Coordenada - direção Z	20	30	40	70	81	82,9	Total
Número de células		20	17	60	16	3	116
Espaçamento da malha		0,50	0,59	0,50	0,69	0,63	

Para o cálculo do alcance do jato no caso de estudo foi efetuada uma nova simulação com tempo de simulação igual a 50 s. A nova simulação tem como condição inicial os resultados obtidos nas simulações anteriores, com $t = 100$ s, e contempla uma nova malha de cálculo. Este procedimento é justificado com a necessidade de diminuição do tempo de cálculo e dado que a consideração do rio na simulação numérica aumenta significativamente a área do domínio computacional, pelo que a utilização de uma malha demasiado refinada seria do ponto de vista do tempo de cálculo inabarcável. Para o cálculo do alcance do jato, recorreu-se ao modo de simulação *restart* do Flow 3D. Na referida simulação foi utilizada a malha de cálculo apresentada na Tabela C12.

Tabela C12 – Malha de cálculo utilizada no modelo 3D para determinação do alcance do jato

Coordenada - direção X	0	20	40	60	140	160	280	300	320	350	520	Total
Número de células		20	25	30	150	30	150	40	30	50	170	695
Espaçamento da malha		1,00	0,80	0,67	0,53	0,67	0,80	0,50	0,67	0,60	1,00	

Coordenada - direção Y	0	20	60	70	80	119	Total
Número de células		30	60	15	10	40	155
Espaçamento da malha		0,67	0,67	0,67	1,00	0,98	

Coordenada - direção Z	0	20	30	40	70	82,9	Total
Número de células		20	15	15	50	20	120
Espaçamento da malha		1,00	0,67	0,67	0,60	0,65	

C.3.6 CONDIÇÕES DE FRONTEIRA E CONDIÇÕES INICIAIS

As condições de fronteira utilizadas no cálculo do modelo numérico são as seguintes:

- Plano de X mínimo: - Caudal Específico (*Volume flow rate – Q*) para $Q = 2062 \text{ m}^3/\text{s}$
- Ponto fixo de entrada (*Specific Pressure – P*) para os restantes caudais simulados ($Q = 896, 690, 527 \text{ e } 303 \text{ m}^3/\text{s}$)
- Plano de X máximo: Escoamento (*Outflow – O*)
- Plano de Y mínimo: Continuidade (*Continuative – C*)
- Plano de Y máximo: Simetria (*Symmetry – S*)
- Plano de Z mínimo: Parede (*Wall– W*)
- Plano de Z máximo: Escoamento (*Outflow – O*)

A adoção de um caudal específico na fronteira de X mínimo (plano YZ correspondente a $X = 0 \text{ m}$) está estritamente ligada com os ensaios de sensibilidade desenvolvidos ao longo do capítulo 4 do presente documento. Tal como mencionado no referido capítulo, a imposição desta condição de fronteira permite a obtenção de melhores resultados para os valores obtidos no que respeita ao caudal descarregado.

Para o plano de X máximo e Z máximo foi adotado a condição de fronteira «Escoamento (*Outflow*)». Esta condição de fronteira impõe um limite de condição de pressão neutra no referido limite, realizando-se o escoamento de forma livre pela referida fronteira. A adoção da fronteira para o limite de X máximo relaciona-se com a adoção de um domínio que apenas simulasse o descarregador, como tal, a referida fronteira permite a obtenção do caudal descarregado pela estrutura. A adoção da mesma condição de fronteira para o valor da fronteira respeitante ao plano de Z máximo justifica-se com o facto de o processo de enchimento do modelo numérico não poder ser gradual. Esta impossibilidade de um enchimento gradual do modelo está relacionada com a imposição da condição de fronteira para o plano X máximo.

Na Figura C11 é apresentado um esquema das condições de fronteira. O referencial utilizado nessa figura é o mesmo que o presente na Figura C8.

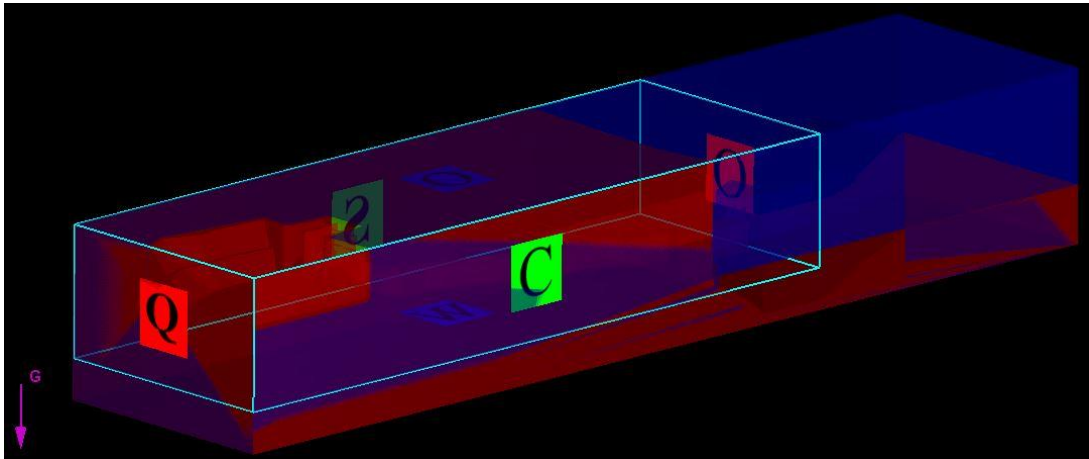


Figura C11 – Condições de fronteira na simulação numérica do descarregador, para $Q=2062\text{m}^3/\text{s}$

As condições iniciais têm também, como já enunciado, uma grande preponderância no bom funcionamento e cálculo de um modelo numérico. O *software* Flow 3D permite a definição de diversas regiões de fluido para o instante $t=0$. Estas regiões definem as condições iniciais e permitem que as equações do movimento sejam aplicadas desde a fase inicial ao fluido contido na definida região de fluido.

No presente caso foram definidas duas regiões de fluido para o instante $t=0$, no entanto, no apenas a primeira região de fluido terá influência no escoamento, sendo que a segunda é respeitante ao nível do rio na zona de restituição dos caudais descarregados. A primeira das duas regiões definidas é respeitante ao nível na albufeira, NPA (152,5). A segunda região de fluido definida diz respeito ao nível de jusante, no leito do rio. São visíveis na Figura C12, a azul, as duas regiões de fluido consideradas.

O Flow 3D permite também a consideração, como condição inicial para $t=0$, de configuração final obtida para uma simulação anterior, considerando para tal o *restart* da mesma. Esta opção permite uma otimização do processo pois as condições iniciais poderão já muito próximas dos limites de convergência finais, o que conduz a uma obtenção mais célere da convergência para o modelo numérico considerado com este processo quando comparado com o modelo com outros valores iniciais.

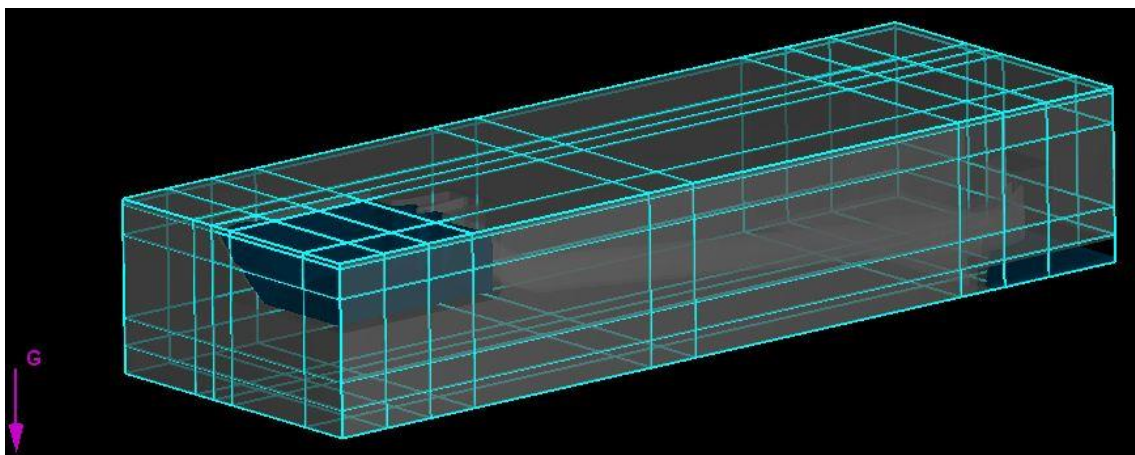


Figura C12 – Condições de fluido para o instante $t=0$ para a simulação numérica do caudal de projeto

C.3.7 MODELOS DE CÁLCULO NUMÉRICO UTILIZADOS

Após definição das condições de iniciais e condições de fronteira para o instante inicial, a definição das condições a adotar nas simulações numéricas passa pelas equações do movimento que definirão a configuração e as propriedades do escoamento ao longo do tempo. Como descrito no capítulo 3, o modelo numérico pode ser calculado tomando-se diferentes modos de cálculo. A resolução das equações do movimento irão, posteriormente, descrever o escoamento estudado partindo das condições iniciais.

No presente trabalho a escolha das diferentes equações do teve em consideração os testes de sensibilidade e a implicação de cada modo de cálculo sobre o tempo cálculo. Como tal, tomou-se como modelo de resolução (*solver*) um modelo de segunda ordem em detrimento de um modelo de primeira ordem. Embora, como referido no capítulo 5, a consideração de equações de segunda ordem leve a um acréscimo do tempo cálculo, a precisão dos resultados evidencia-se vantajosa.

Para cálculo de convergência numérica foi adotado o modelo GMRES (*generalized minimal residual method*). Embora seja um modelo mais complexo e, por consequência, requeira mais tempo e capacidade de cálculo é adequado para o estudo efetuado. Esta escolha é fundamentada na grande complexidade e dimensão da estrutura do descarregador. Por tal facto, a malha não pode ser muito refinada e, como tal, é necessário que se procure uma maior convergência em cada nó da malha por forma a obter resultados mais satisfatórios sem que seja necessário refinar a malha utilizada.

Por fim, como modelo de turbulência foi adotado o modelo RNG, descrito no ponto 2.3.4 do presente documento. Este modelo apresenta bons resultados em escoamentos de baixa intensidade de turbulência. Dado que o escoamento no total do domínio computacional considerado é misto, sendo que é turbulento na zona de impacto do jato e, de um modo geral, não turbulento na estrutura do descarregador, este modelo adequado é apropriado ao modelo numérico em causa. A opção pelo modo de cálculo RNG está relacionada com o facto de o modelo em causa, sendo uma variação do modelo de turbulência $k - \epsilon$, tem em consideração uma base empírica. O modo RNG recorre a uma formulação semi-empírica que recorreu ao tratamento estatístico de diversos estudos de caso aquando da formulação do referido modo, tal como descrito capítulo 3.

Modelação numérica 3D de escoamentos em descarregadores de cheia.

Aplicação ao descarregador de cheias complementar do aproveitamento hidroelétrico da Caniçada.

Anexo D

Modelação numérica 3D de escoamentos em descarregadores de cheia.

Aplicação ao descarregador de cheias complementar do aproveitamento hidroelétrico da Caniçada.

D.1 DEFINIÇÃO DO MODELO GEOMÉTRICO

A construção de um qualquer modelo numérico tem início na definição das condições de geometria do objeto a simular. Ao objeto resultante destas definições geométricas dá-se o nome de modelo geométrico. O Flow 3D não é exceção neste processo e o primeiro passo da construção do modelo numérico consiste na indicação, por parte do utilizador, do modelo geométrico. Para esta definição do modelo geométrico associado ao Descarregador Complementar da Barragem de Caniçada, foi efetuado um desenho 3D com recurso ao *software* AutoCad 3D base nos desenhos fornecidos pelo LNEC e que correspondem às formas finais de projeto.

As formas finais de projeto do DCC evoluíram do projeto inicial efetuado pela Aqualogus e que posteriormente foram estudadas e otimizadas no Laboratório Nacional de Engenharia Civil sob encomenda da Aqualogus e da EDP. Dos desenhos disponíveis para a construção do modelo geométrico 3D consta uma planta geral, um perfil transversal e ainda dois desenhos com pormenores da parte inicial do descarregador. Dos dois desenhos de pormenor do descarregador, o primeiro contempla diferentes cortes e o perfil da parte inicial do descarregador, antes da secção anterior ao túnel de inclinação e secção contínua. O segundo, é um desenho de pormenor que explicita a transição e variação de secção antes da fase regular do descarregador.

Dada a elevada complexidade da estrutura respeitante ao Descarregador de Cheias Complementar de Caniçada, a construção do modelo geométrico comporta consequentemente uma elevada complexidade em termos de desenho a três dimensões o que pode levar a pequenas imprecisões na sua representação. A construção do modelo geométrico é discriminada de seguida.

Na elaboração do ficheiro “.stl” para integração no Flow 3D houve recurso a diferentes técnicas disponibilizadas no programa AutoCad 3D, que tornaram possível assim a construção do modelo em termos geométricos.

O modelo geométrico foi construído partindo de montante para jusante. A construção foi efetuada partindo do ponto mais a montante da plataforma de entrada, como pode ser observado na Figura D1. Por uma questão de facilidade de construção optou-se, à partida, pela orientação do descarregador segundo o eixo X do modelo geométrico. Partindo desta consideração o septo central está, na maioria do seu desenvolvimento, orientado segundo X-X, diferindo apenas na parte final do descarregador.

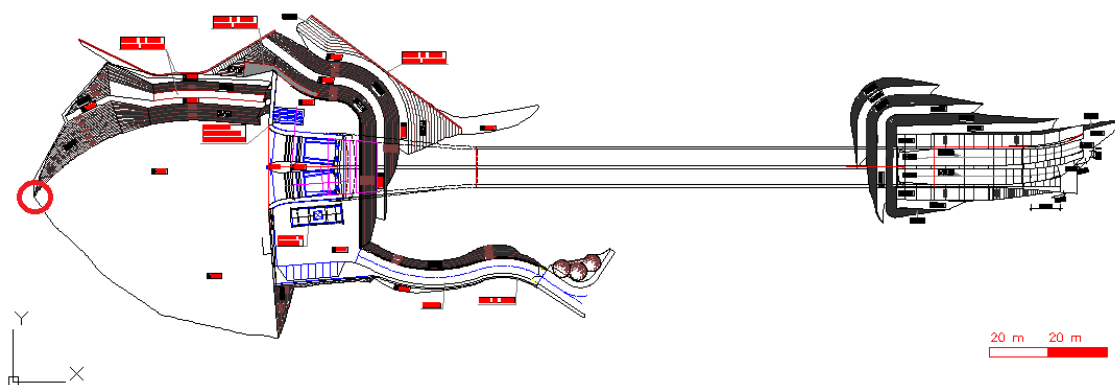


Figura D1 - Ponto X=0 e orientação do descarregador durante a construção

Segundo a orientação Y, optou-se pela redução da largura da parte direita da plataforma de entrada. Esta opção é justificada com a necessidade de redução do domínio computacional e consequentemente, por via da redução do domínio, redução do tempo e peso de cálculo do modelo numérico associado. Esta redução da largura da plataforma é também justificada pelo facto de

que essa redução não apresenta uma interferência com o escoamento no Descarregador de Cheia dada a largura e de acordo com os testes realizados no ponto 5.2. Posto isto, para ponto inicial do modelo, segundo o eixo Y, foi tomado o ponto que dista 25m (segundo Y) do ponto final de inflexão do muro lateral direito da entrada do descarregador. Este valor é duas vezes superior ao valor da altura de dimensionamento da soleira normal (H_d), sendo que é um valor suficientemente elevado para a estabilização do caudal seja garantida.

Por fim, para a orientação segundo o eixo Z do modelo geométrico e também com o intuito de reduzir as dimensões do domínio computacional, foi tomada como cota da plataforma de entrada, no modelo geométrico, a cota de 60. Esta plataforma na situação real corresponde à cota 131,5. Situando-se, portanto, a diferença de cotas entre o modelo geométrico e a situação real, em 61,5m. A definição da cota de 60 do modelo geométrico para a cota do patamar de aproximação deve-se à necessidade de assegurar que existe posteriormente uma folga para a representação do rio. Dado que a cota mínima do rio, na topografia real, é de cerca de 75 e a cota do patamar é de 131,5, a diminuição de 71,5 metros possibilita que na representação do rio ainda se tenha uma folga máxima de 4,5 m.

Foi construída, através da função *loft* do *software* AutoCad 3D, o talude esquerdo a montante do descarregador, com o objetivo de simular o melhor possível as condições de entrada. O comando *loft* permite que, definidas duas secções em diferentes planos, se desenhe uma transição (regular) entre as duas diferentes secções. O referido talude, sendo resultado de um processo de escavação, tem inclinação constante entre patamares, embora em planta apresente uma configuração complexa. Na parte mais a montante do talude, já parte final de escavação, foi feita uma aproximação. Esta aproximação foi construída como sendo uma continuação do talude a ser escavado. A aproximação aqui referida, dada a elevada distância à entrada do descarregador, não terá influência no escoamento, apenas servindo de barreira para a delimitação da parte respeitante à albufeira.

Na Figura D2, pode ser observado o talude de entrada em planta e na construção geométrica bem como os limites para a plataforma de entrada do descarregador assumida na construção do modelo geométrico.

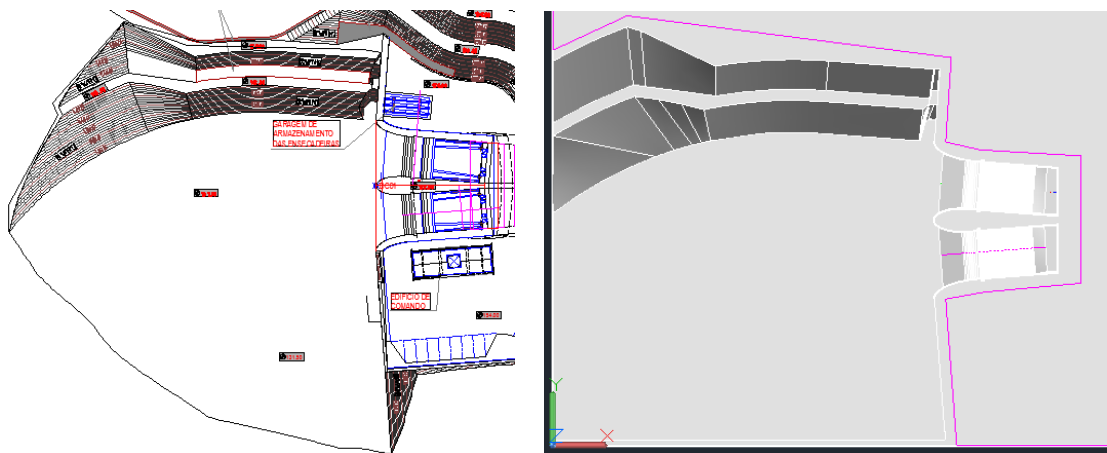


Figura D2 - Esq. Talude de entrada (Planta) Dir. Modelo geométrico (Planta)

Seguidamente, a construção do modelo passou pela definição das estruturas pertencente ao descarregador e que se encontram mais a montante. Destas estruturas, fazem parte o pilar central do descarregador, visível na Figura D2 e as paredes laterais que confinam a estrutura de entrada. Também a parte da soleira normal (do tipo WES) presente no fundo na estrutura de entrada foi representada e construída nesta fase inicial.

Para a construção desta primeira parte foi utilizado o comando *Extrude* do Autocad 3D. Este comando permite que, após definida uma secção, se extruda essa secção ao longo de uma direcção definida. Sendo que o pilar central e as paredes laterais são verticais e de secção constante segundo Z, a utilização deste comando foi possível. No caso da soleira de entrada, uma soleira normal, foi utilizado o mesmo comando. Como pode ser observada na Planta disponível, presente no Anexo A.1, as linhas representantes das curvas de nível da soleira são paralelas entre si e perpendiculares à orientação dominante das paredes laterais e do pilar central. Sendo então a soleira regular ao longo do seu eixo e embora esta tenha um ângulo definido relativamente ao eixo X, foi, como referido, construída através do comando *Extrude* e posteriormente rodada do ângulo relativo ao alinhamento do canal. Para a construção deste módulo do descarregador foram utilizadas as informações presentes no perfil longitudinal para definição do perfil da soleira normal e da planta para definição da orientação desse mesmo perfil. Existe a indicação por parte da Aqualogus que o Perfil transversal, presente no Anexo A.2, se situa no eixo do canal do descarregador. Sendo a configuração do pilar simétrica à da parede por este mesmo eixo, é correta a definição da soleira normal por meio da extrusão do perfil. Após a extrusão do perfil da soleira esta sofreu uma rotação de acordo com a orientação do perfil (a cor magenta no interior do vão direito do descarregador, da figura do lado direito da Figura D2). A parte respeitante à parte inicial do descarregador, já após a união de todas as partes acima descritas, pode ser observada a Figura D3.

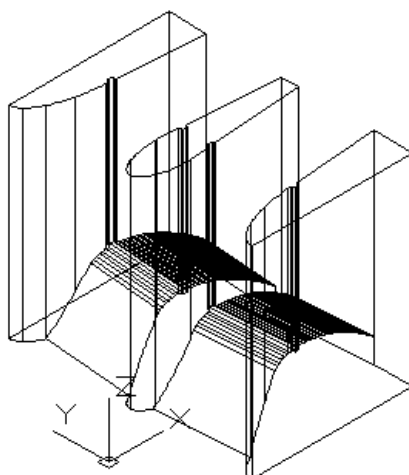


Figura D3 - Parte inicial do descarregador

Após a construção da parte inicial e analisado o desenho que continham os cortes de diferentes pontos do descarregador, presente no Anexo A.3, o processo de construção do modelo geométrico passou pela construção do descarregador através da subtração da parte interior do descarregador a um sólido de maiores dimensões. Ou seja, procedeu-se à construção da parte interior do descarregador para que fosse posteriormente subtraído a um sólido. Dada a complexidade das fases de transição entre as secções do descarregador foi utilizado o comando *Loft* fazendo a transição entre os diferentes cortes disponíveis. A transição entre os diferentes cortes foi efetuada sempre segundo uma diretriz ou caminho. Essa diretriz diz respeito à configuração do fundo, presente no perfil disponível. Através da diretriz observável no perfil, procedeu-se à sua colocação em planta segundo a orientação correspondente à linha média do vão do descarregador. Posteriormente foram tidas em conta as orientações dos cortes fornecidos e presentes no Anexo A.3. Cada corte tinha uma direcção que era perpendicular ao fundo do descarregador, fazendo portanto, um ângulo negativo (menor que $\frac{\pi}{2}$) relativamente ao eixo Z. Os cortes apresentados

apresentavam também um ângulo menor que $\frac{\pi}{2}$ relativamente ao eixo Y, sendo que neste caso o sinal do ângulo era diferente para os diferentes vãos. Negativo e positivo, para os vãos esquerdo e direito, respetivamente. Este ângulo segundo o eixo Y é fruto do facto de o perfil apresentado se definir ao longo da linha central do vão do descarregador. Após colocados corretamente os cortes segundo a posição dos mesmos foi efetuado então o *loft* entre os diferentes cortes, obtendo-se a parte interior do descarregador de cheias.

Essa parte interior do descarregador foi posteriormente subtraída ao sólido com o objetivo de formar o canal. A parte referente a este processo encontra-se representada na Figura D4. Na referida figura é possível observar os diferentes cortes utilizados que se encontram representados ao longo da peça, sendo que as estruturas iniciais e finais correspondem também a cortes fornecidos, presente no Anexo A.3. O último corte, correspondente à parte final da peça apresentada, é o respeitante à parte regular do canal e que se desenvolverá no troço seguinte. Esse troço apresenta secção e inclinação constante.

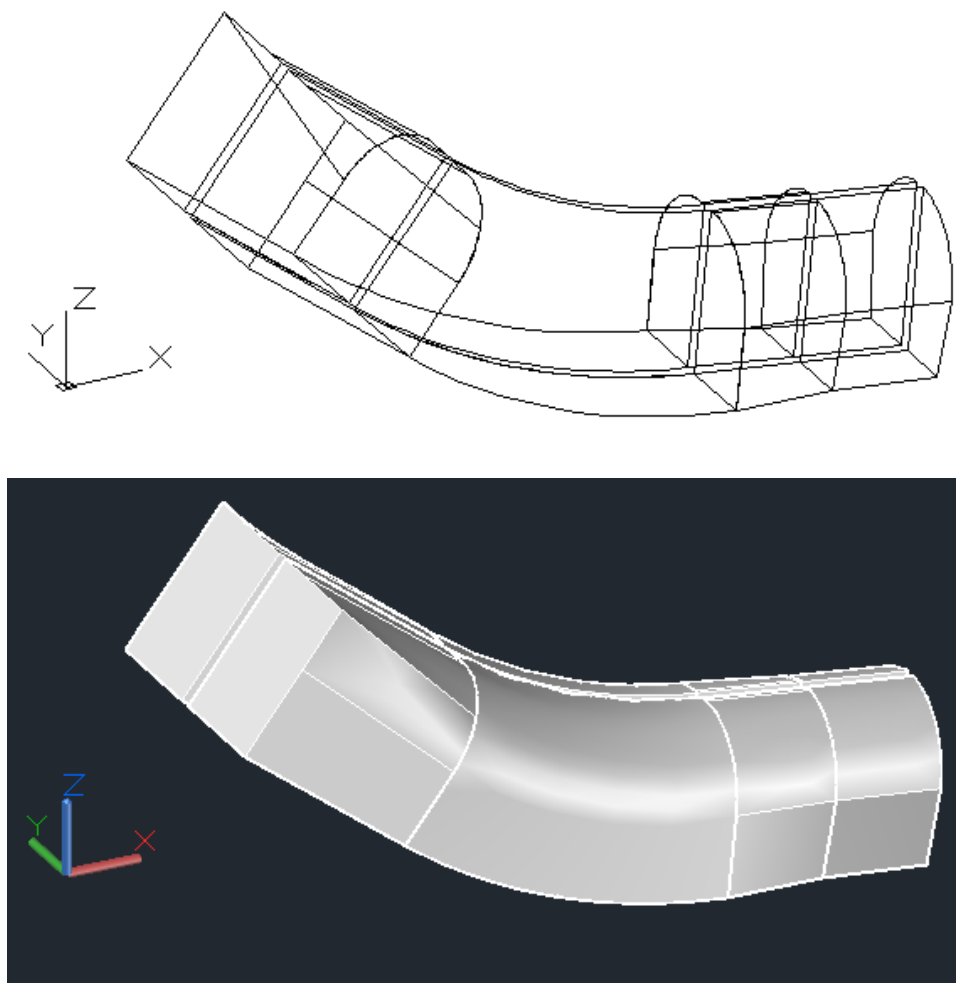


Figura D4 - Secção interior do 2º troço do descarregador (sem e com preenchimento sólido)

Após este troço, e como já referido, segue-se a parte regular do descarregador de cheias. A parte regular do descarregador é caracterizada por uma inclinação constante igual a 10,3%. A secção é também constante ao longo do troço. Para a construção do mesmo recorreu-se, tal como no troço anterior, ao comando *Loft* entre duas secções. Uma das secções localiza-se na parte consequente à acima apresentada e a outra secção no final do troço regular e fim de túnel. Esta última secção correspondente ao ponto de intersecção do fim do túnel com o fundo do descarregador. Executado o comando *Loft*, foi necessário “cortar” a peça resultante de acordo com a inclinação apresentada em perfil para o final do túnel, visível no Anexo A.2. Dado que este troço não tem variação de

largura nem de direção segundo Y, a medição do comprimento do troço foi efetuada com recurso à planta disponível. Na Figura D5 é possível observar o objeto resultante deste processo já após a subtração das partes interiores do descarregador ao sólido de maiores dimensões e que corresponde ao troço regular e da parte de transição anterior.

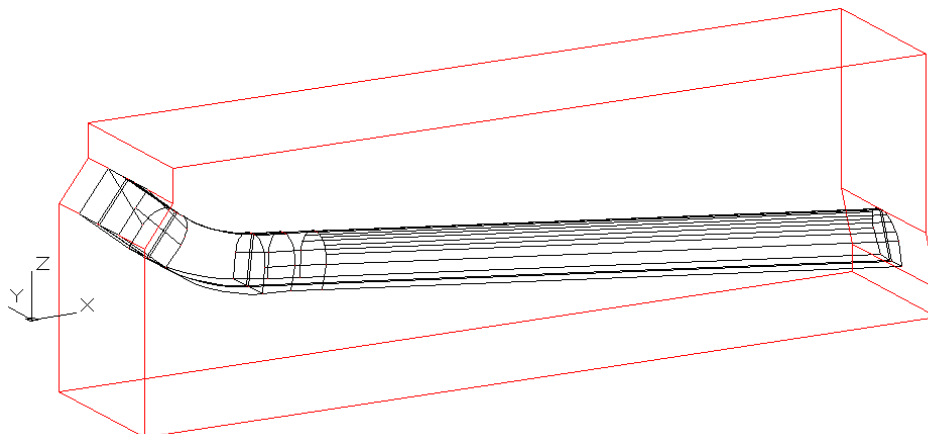


Figura D5 - Bloco central do descarregador

Após o troço regular acima apresentado existe uma zona de transição entre o descarregador em túnel com base trapezoidal e o canal retangular. De acordo com o medido em planta, o comprimento da fase de transição é de 10m. A inclinação é constante ao longo desta fase de transição sendo que para a construção do modelo geométrico recorreu-se ao disfarce da transição entre o trapézio e a reta ao longo desses 10 metros. Na fase imediatamente após o túnel considerou-se uma secção com base trapezoidal, tal como na secção anterior e a parte restante vertical. O pormenor desta fase de transição pode ser observada na Figura D6.

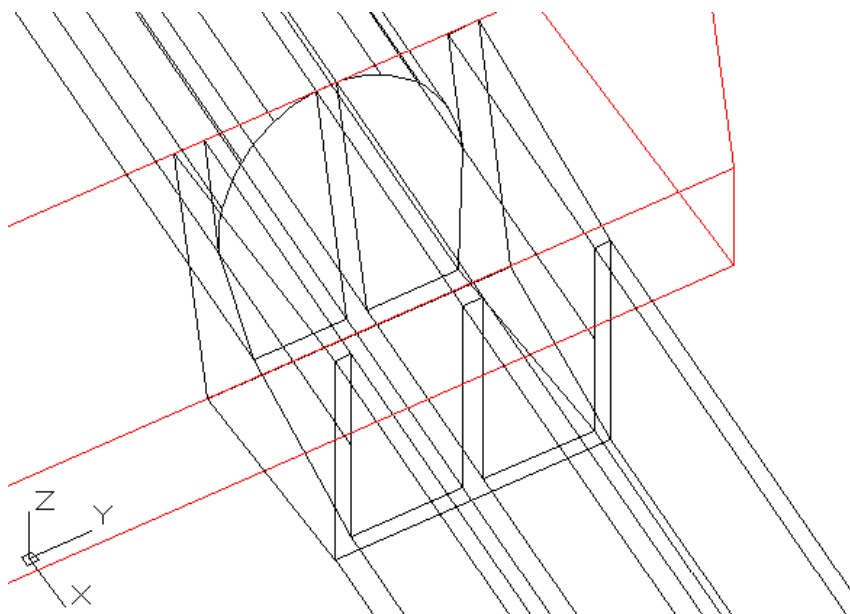


Figura D6 - Zona de transição do final do túnel do descarregador

A parte final do descarregador, tal como no troço inicial, foi construído com recurso ao comando *Extrude* do AutoCad 3D. Com base na planta do descarregador foi definida a configuração das paredes laterais e do septo central do canal do descarregador de cheias. Com a definição da geometria através da planta foi possível construir a curva existente na parte final do descarregador. Essa curva tem por objetivo a orientação do escoamento para o talvegue do rio e, com isso, minimizar erosões nas margens do rio. Após esta extrusão, em planta, das paredes do

descarregador foi efetuado o mesmo processo em perfil por forma a construir o fundo do descarregador. Estes dois objetos, após a sua construção, foram interligados tomando como referência o ponto mais distante do descarregador segundo o eixo X e que corresponde ao final do descarregador. Posteriormente foram extraídas as partes “sobrantes” da extrusão para que a peça ficasse com a mesma configuração do Descarregador de Cheias Complementar de Caniçada. A parte final do descarregador de cheia pode ser observada na Figura D7.

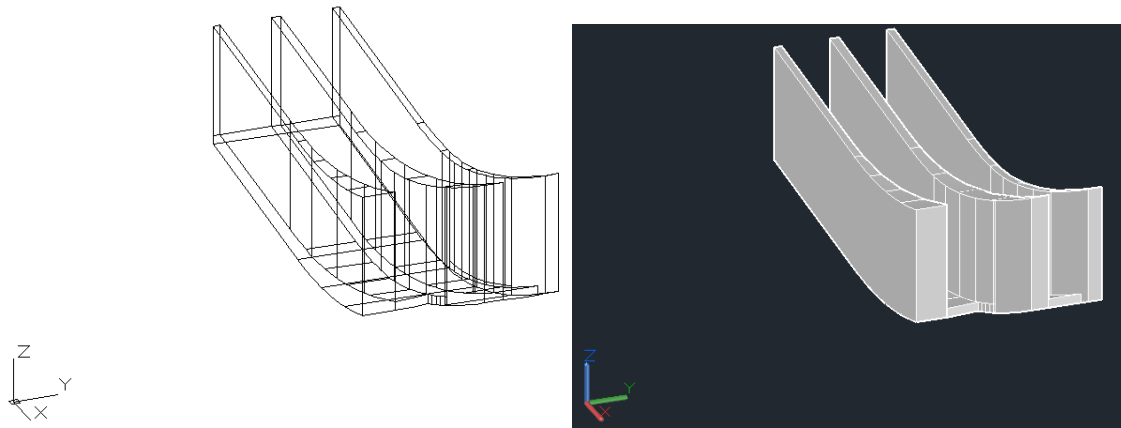


Figura D7 - Parte final do descarregador

Após a construção da parte final do descarregador houve a necessidade de construir a parte respeitante ao rio, para a simulação do alcance do jato descarregado. Para este processo e dada a complexidade da configuração natural das margens do rio foi efetuada uma simplificação optando-se pela regularização das margens. Tendo em conta que no presente estudo a representação do rio apenas tem por objetivo a medição do alcance do jato, esta aproximação e simplificação não terá grande interferência nos resultados obtidos, pois os resultados respeitantes a estas medições são influenciados maioritariamente pelo nível de água no rio. Para a referida simplificação foi efetuada a construção de um perfil tipo, a montante, para a posição de $Y=0$ (plano X-Z) no modelo geométrico e um outro perfil tipo, a jusante, para o plano X-Z em $Y=120$, também em modelo geométrico. Este perfil tipo foi construído com recurso à interceção das linhas de nível disponíveis na Planta Topográfica da região, visível no Anexo A.5. Após a definição do perfil tipo de montante e jusante do rio foi representado o rio através da consideração de um alinhamento reto entre os dois perfis. A configuração final do canal do rio é a observada na Figura D8 – vista do lado Y max.

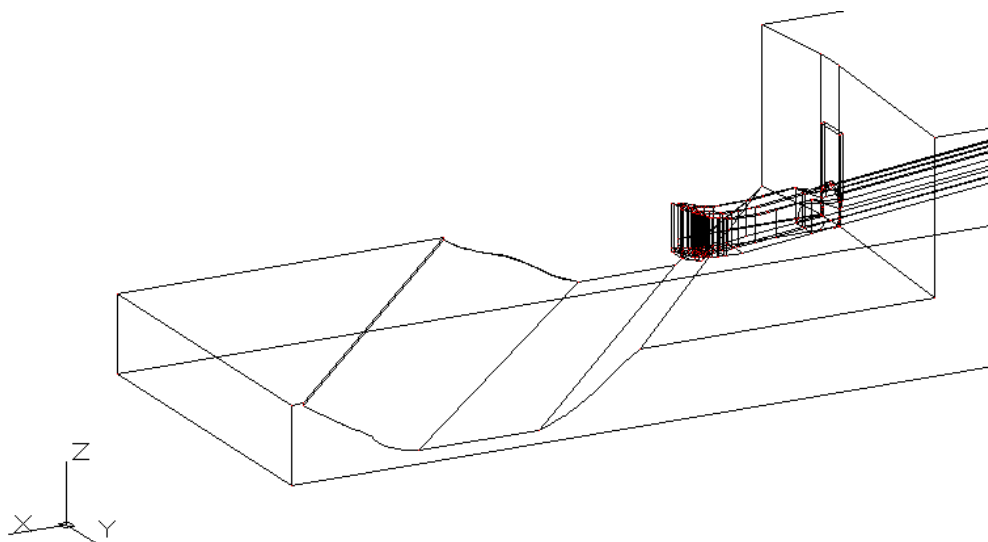


Figura D8 - Parte final do descarregador e parte representante do rio

Após a construção dos troços acima descritos seguiu-se a montagem dos mesmos por forma obter o modelo geométrico final. Esse modelo geométrico passará a constituir o espaço computacional simulação. Para esta construção foi tida como condição prioritária a concordância do fundo e paredes do descarregador para que não houvesse qualquer descontinuidade que pudesse afetar o escoamento e consequentemente os resultados obtidos.

Aquando da montagem das diferentes parcelas foi detetado que existiam algumas fases de transição que não estavam concordantes com a fase posterior. Estas diferenças têm origem na diferente forma de construção das paredes integrantes do modelo geométrico bem como nos diferentes desenhos utilizados na construção do modelo. A primeira dessas incongruências diz respeito à transição intermédia entre a soleira normal e o primeiro corte disponível do canal. Nesta zona, com o intuito de assegurar continuidade do canal e tentar evitar perturbações no escoamento foi adotada uma variação linear. Em perfil esta zona de transição apresenta inclinação constante e igual a 77%, mas devido ao facto de o perfil não ser paralelo ao eixo do X, nesta secção, existe uma diferente elevação do fundo para a parede direita e esquerda de cada vão do descarregador. Dado que existe um ângulo da orientação do perfil em relação ao eixo X, também os cortes existentes antes e depois desta secção de transição têm ângulos diferentes com o eixo Y, como tal as distâncias na parte do septo e na parte da parede lateral são diferentes. Para suprimir estes factos e ainda o facto de que esta zona de transição se encontra, em planta, sobreposta pela comporta, optou-se pela variação linear entre os diferentes perfis. As paredes laterais e o septo central, visíveis em planta, foram, tal como para a parte inicial, extrudidas definindo assim o contorno lateral do descarregador nesta zona. Para a definição do topo do segmento aqui referido foi também utilizada a técnica de extrusão, partindo do desenho em perfil e *a posteriori* definindo a rotação com base no apresentado em planta. Os dois blocos de transição do fundo podem ser observados na Figura D9 a verde e vermelho. A parte do topo, por sua vez, é observável no canto superior direito ainda que de forma menos evidente.

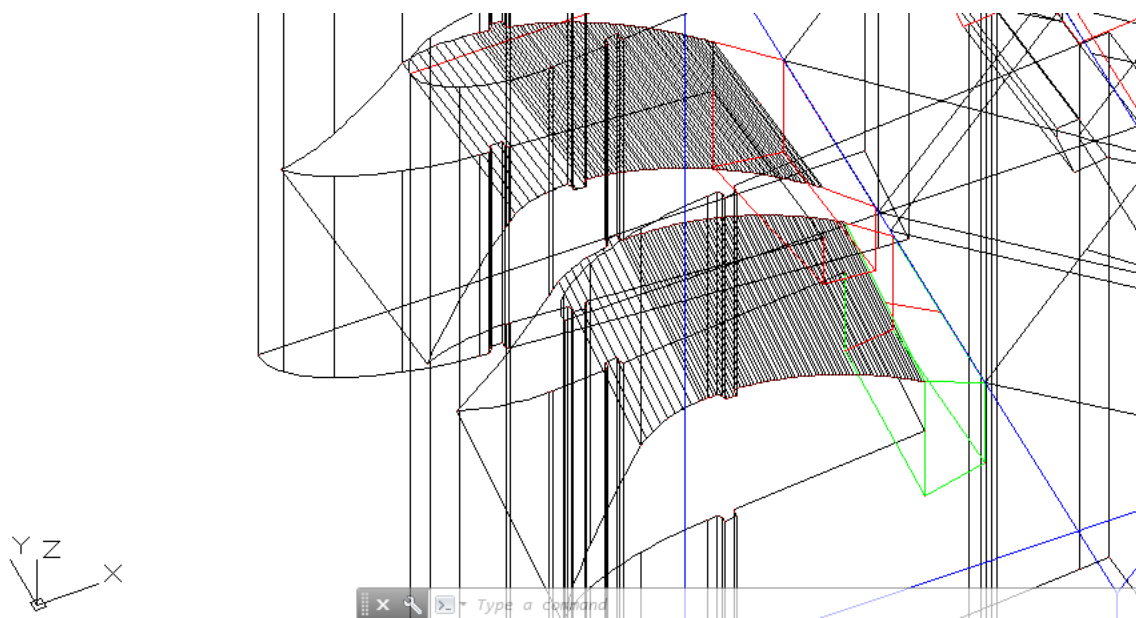


Figura D9 - Zona inicial de transição soleira normal troço definido por cortes

Definidas as partes de transição e ficando todos os diferentes trechos do descarregador de cheias com uma parte correspondente no trecho seguinte efetuou-se a ligação de todos os trechos. O correspondente modelo geométrico resultante é apresentado na Figura D10.

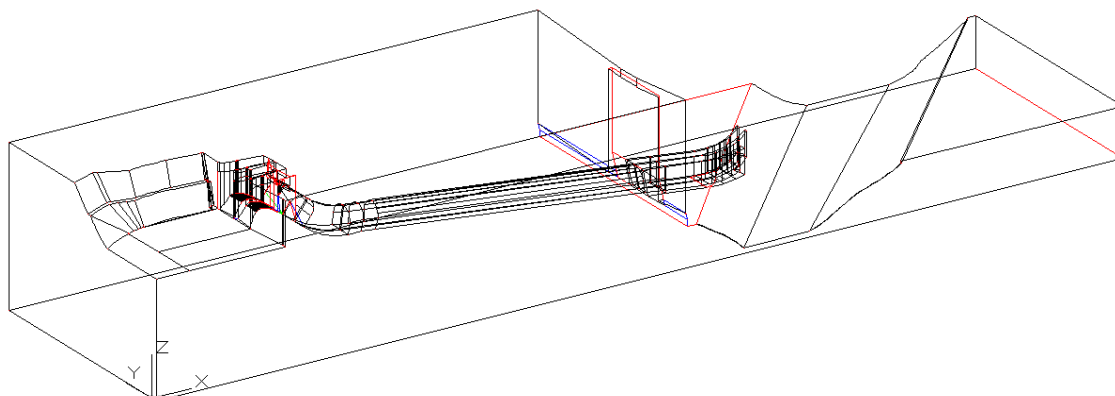


Figura D10 – Modelo geométrico final

No final da construção acima descrita foi efetuada a verificação dos pontos de controlo da geometria e pontos notáveis dos posteriores ensaios, como os pontos de tomada pressão. Aquando dessa verificação, reparou-se na existência de erros em alguns dos pontos da configuração. O modelo geométrico era concordante com a planta para os valores de X e Y, mas não nas dimensões respeitantes ao eixo Z. Os erros calculados, em Z, resultantes das diferenças entre o modelo geométrico e o perfil transversal são os apresentados na Tabela D1.

Tabela D1 - Diferenças entre modelo geométrico e perfil longitudinal

Tomada de pressão	Distância MG [Z] (m)	Distância perfil [Z] (m)	Diferença (m)	Variação da diferença (m)
1	66.6507	66.6512	-0.0005	
2	67.0552	67.0542	0.001	0.0015
3	66.6963	66.6942	0.0021	0.0011
4	64.1887	64.1822	0.0065	0.0044
5	60.4904	60.4792	0.0112	0.0047
6	56.6429	56.6222	0.0207	0.0095
7	48.7653	48.9722	-0.2069	-0.2276
8	43.1156	43.5622	-0.4466	-0.2397
9	39.4903	39.9472	-0.4569	-0.0103
10	36.7578	37.2162	-0.4584	-0.0015
11	33.8675	34.3252	-0.4577	0.0007
12	24.9001	25.3572	-0.4571	0.0006
13	23.4602	23.5052	-0.045	0.4121
14	22.6371	23.1242	-0.4871	-0.4421
15	23.3069	23.8362	-0.5293	-0.0422
16	24.7512	25.6162	-0.865	-0.3357

Como é notório pela análise da Tabela D1 existem pontos em que as diferenças verificadas são da ordem das dezenas de centímetros o que não é, de todo, negligenciável. A somar ao facto de existirem estas elevadas diferenças em determinados pontos, existe o facto de que, dado que a estrutura é contínua, muitos dos erros se acumulam ao longo da estrutura. Sabendo-se *a priori*

que o modelo de comparação é um modelo físico reduzido construído à escala um para sessenta e dois, os erros não assinalados na Tabela D1 podem não ser considerados como tal pois, um erro de 4 cm, como o máximo erro não assinalado, corresponde a 0,65mm à escala do modelo reduzido. Para suprimir e corrigir os erros assinalados verificou-se que seria bastante a alteração da curva de concordância em perfil. Esta curva, com cinquenta metros de raio, faz a concordância entre as duas secções de inclinação constante de 77% e 10,3%. Fixada a cota da parte regular do descarregador, com 10,3% de inclinação, com base nos pontos de controlo obtidos pelo perfil e fazendo a concordância da mesma com o trecho que 77% de inclinação, obteve-se uma curva com raio $R=50,2046m$.

Após esta alteração no raio de concordância no modelo geométrico, procedeu-se novamente à medição das diferenças entre os pontos de controlo e os correspondentes pontos no modelo geométrico. As referidas diferenças são apresentadas na Tabela D2. São também apresentados os valores na escala 1/62 para que se tenha uma noção da amplitude das diferenças à escala do modelo físico reduzido.

Tabela D2 - Diferenças para a configuração geométrica final

Tomada de pressão	Distância MG [Z]	Distância perfil [Z]	Diferença	Diferença modelo físico (cm)
1	66.5955	66.5960	-0.0005	0.00
2	67.0000	66.9990	0.0010	0.00
3	66.6412	66.6390	0.0022	0.00
4	64.1340	64.1270	0.0070	0.01
5	60.4362	60.4240	0.0122	0.02
6	56.5863	56.5670	0.0193	0.03
7	71.1050	71.0830	0.0220	0.04
8	43.5157	43.5070	0.0087	0.01
9	39.9021	39.8920	0.0101	0.02
10	37.1691	37.1610	0.0081	0.01
11	34.2788	34.2700	0.0088	0.01
12	25.3114	25.3020	0.0094	0.02
13	23.8715	23.4500	0.4215	0.68
14	23.0900	23.0690	0.0210	0.03
15	23.8158	23.7810	0.0348	0.06
16	25.3104	25.2610	0.0494	0.08

De salientar que continua a persistir uma diferença na tomada de pressão 13. Não foi possível identificar a origem deste erro, no entanto e para considerações e cálculos futuros foram tomados o valos do modelo geométrico como estando corretos. Todos os outros valores e como é notório na tabela, têm erros inferiores cinco centímetros o que à escala do modelo reduzido significa uma diferença inferior a um milímetro.

A configuração final é em termos macroscópicos semelhante à apresentada na Figura D10. Os erros existentes anteriormente não são perceptíveis à escala total do domínio computacional.

D.2 CONFIGURAÇÃO FINAL DO ESCOAMENTO, PARA $T = 100$ S

D.2.1 CONFIGURAÇÃO FINAL PARA $Q = 896$ M³/S

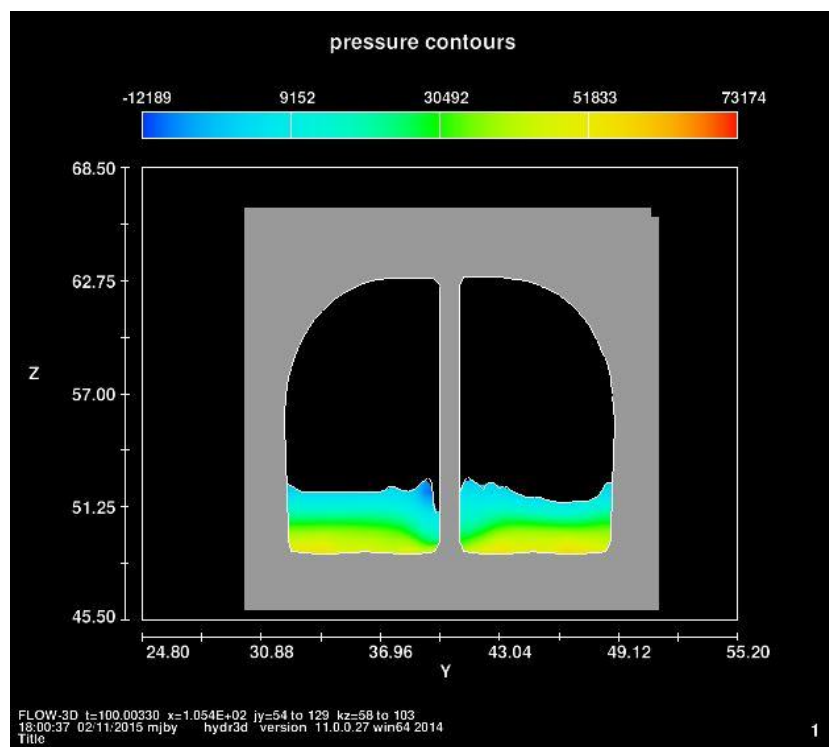


Figura D11 – Configuração final da superfície livre do escoamento para 896 m³/s na secção 1

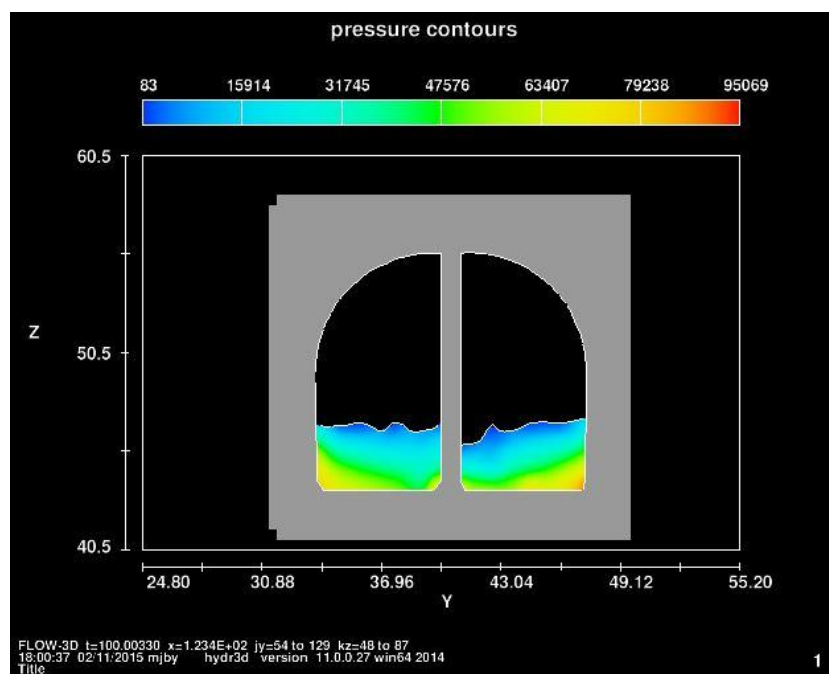


Figura D12 – Configuração final da superfície livre do escoamento para 896 m³/s na secção 2

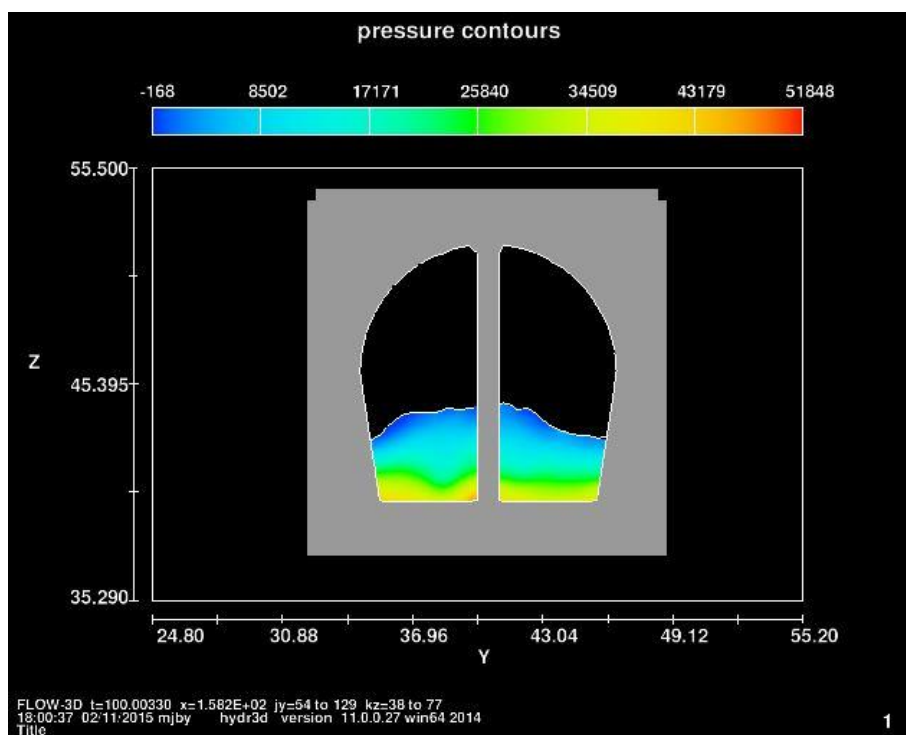


Figura D13 – Configuração final da superfície livre do escoamento para 896 m³/s na secção 3

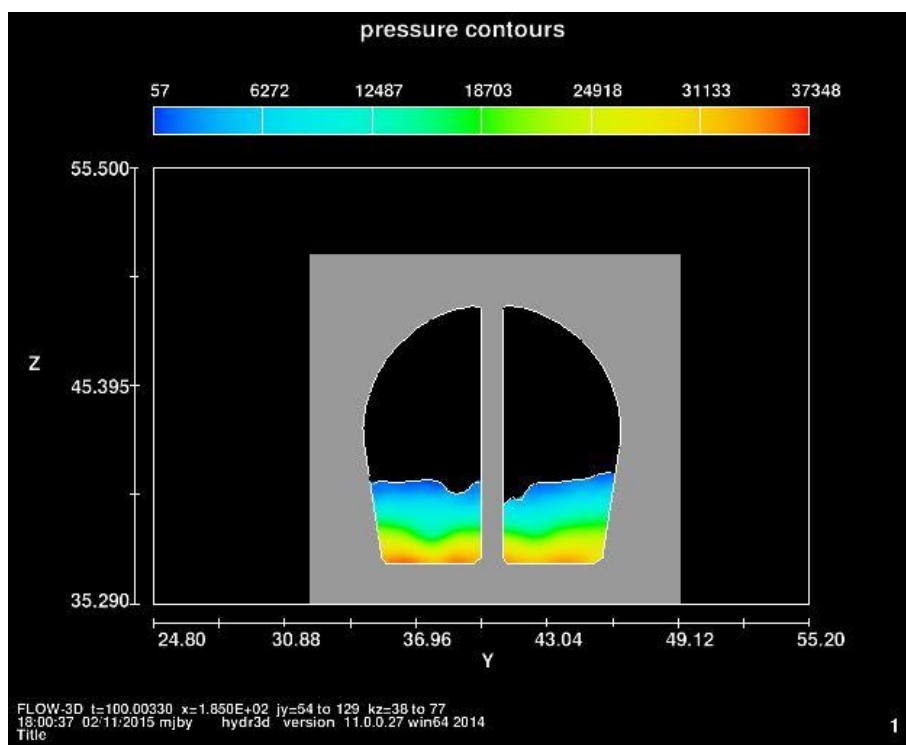


Figura D14 – Configuração final da superfície livre do escoamento para 896 m³/s na secção 4

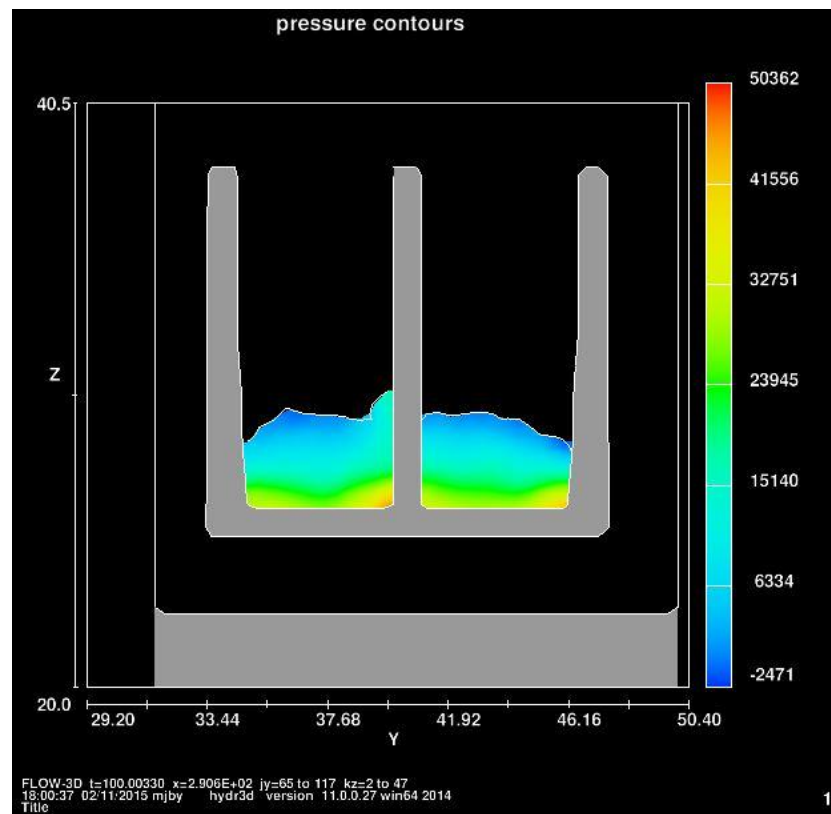


Figura D15 – Configuração final da superfície livre do escoamento para $896 \text{ m}^3/\text{s}$ na secção 5

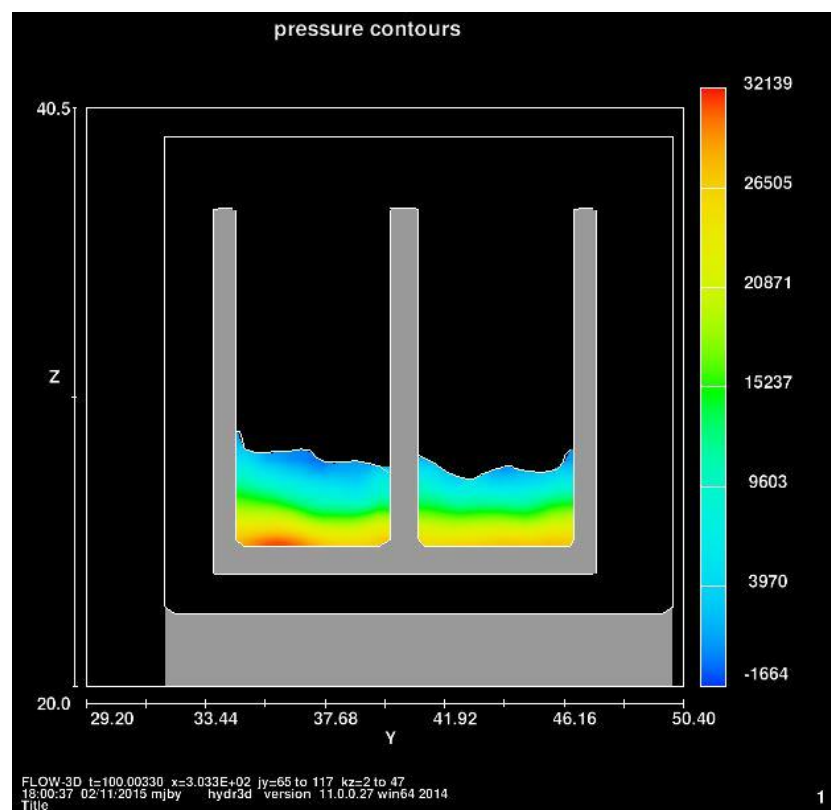


Figura D16 – Configuração final da superfície livre do escoamento para $896 \text{ m}^3/\text{s}$ na secção 6

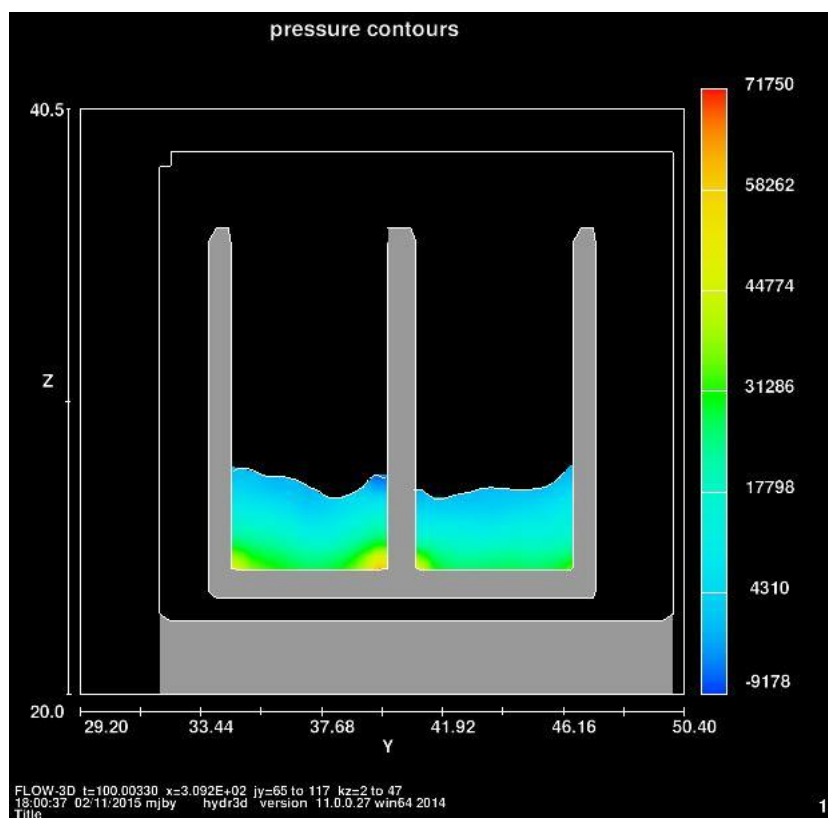


Figura D17 – Configuração final da superfície livre do escoamento para 896 m³/s na secção 7

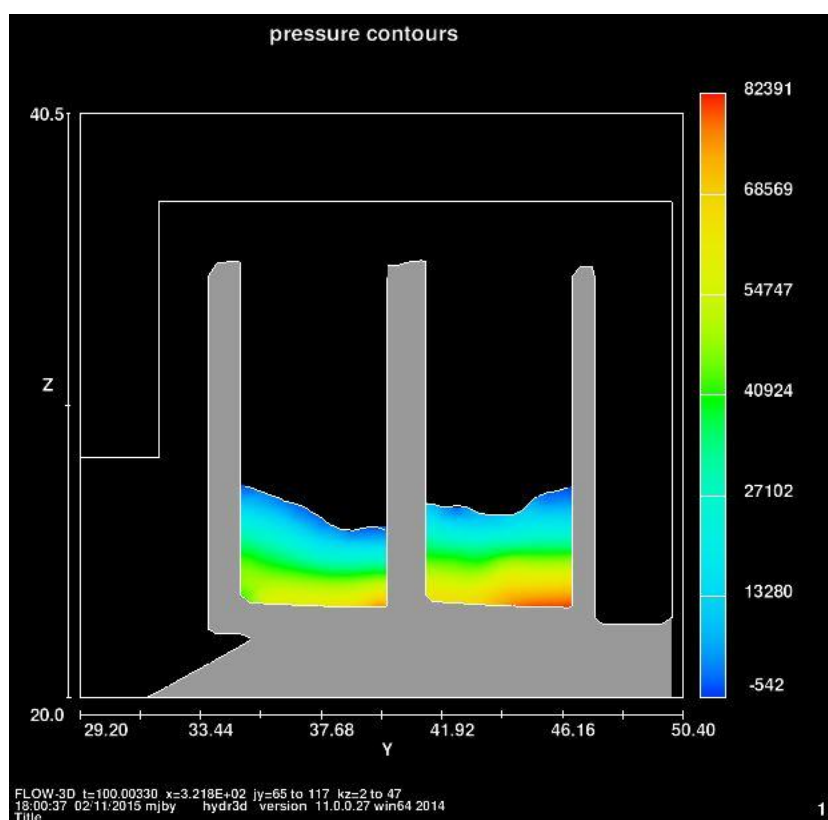


Figura D18 – Configuração final da superfície livre do escoamento para 896 m³/s na secção 8

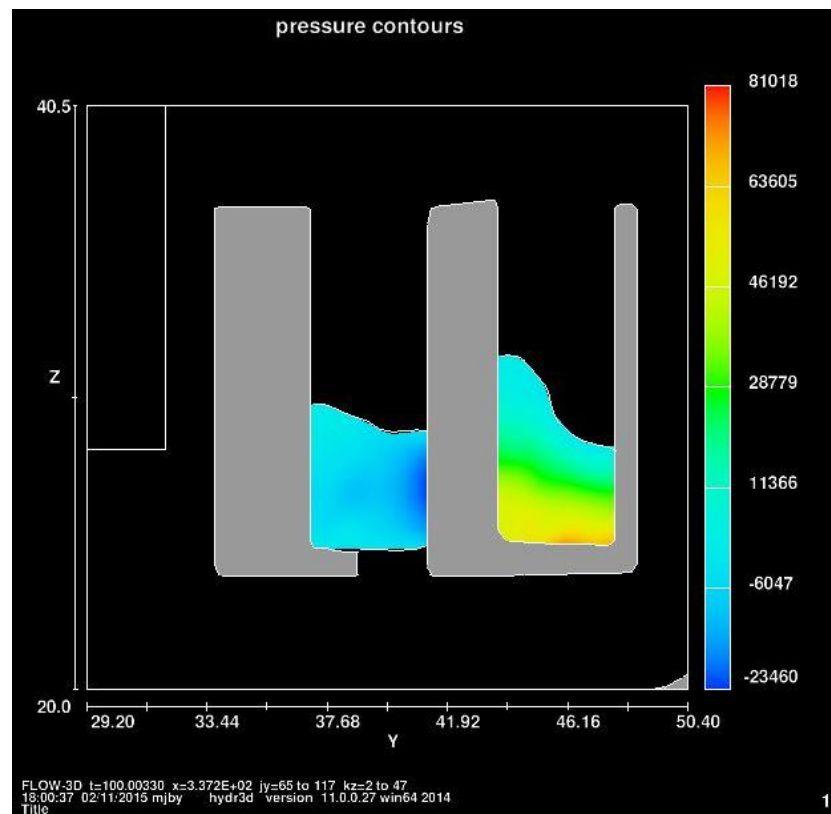


Figura D19 – Aspeto da superfície livre final do escoamento para 896 m³/s na secção 9

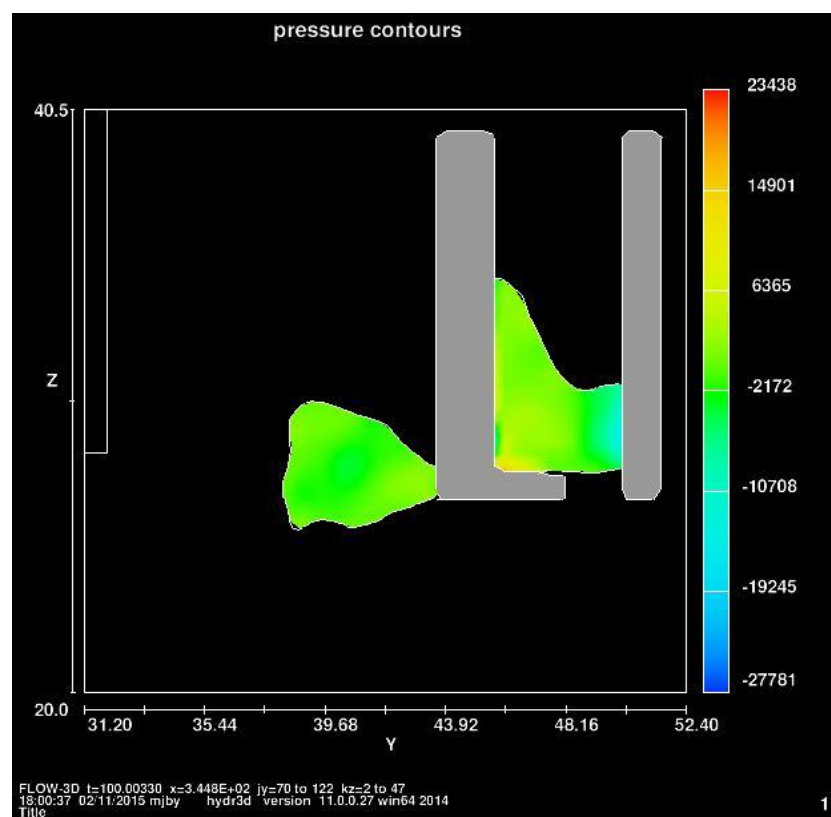


Figura D20 – Configuração final da superfície livre do escoamento para 896 m³/s na secção 10

D.2.2 CONFIGURAÇÃO FINAL PARA $Q = 690 \text{ m}^3/\text{s}$

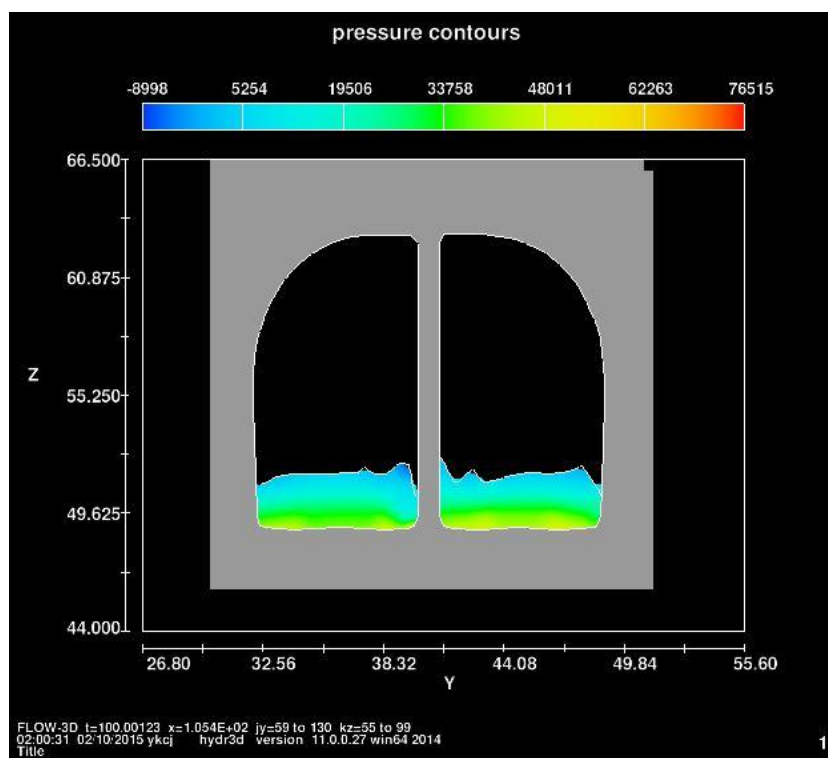


Figura D21 – Configuração final da superfície livre do escoamento para $896 \text{ m}^3/\text{s}$ na secção 1

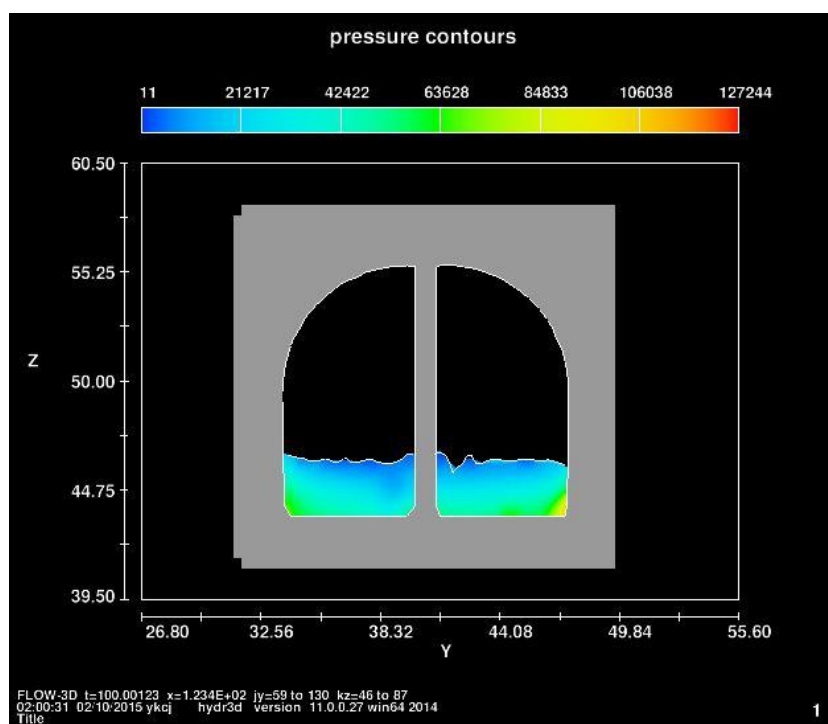


Figura D22 – Configuração final da superfície livre do escoamento para $896 \text{ m}^3/\text{s}$ na secção 2

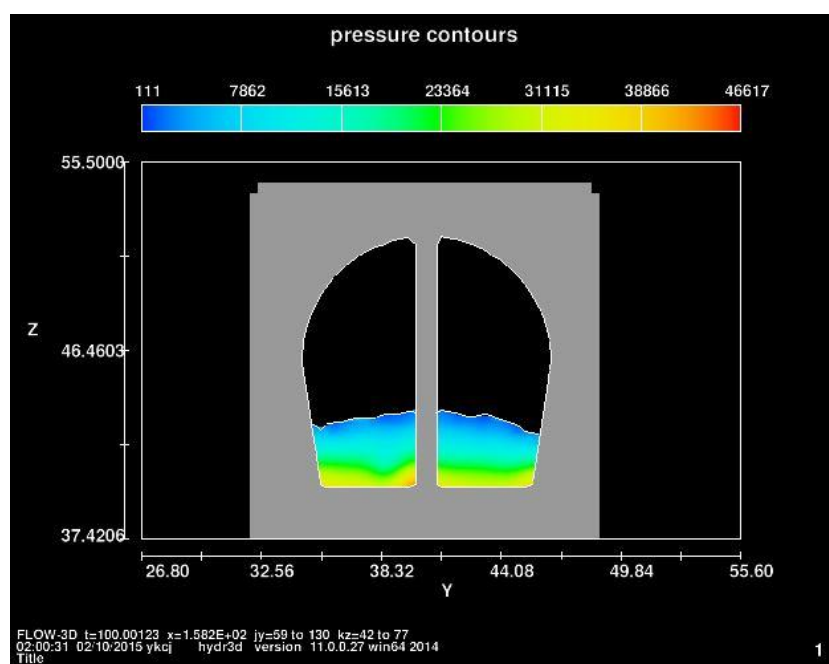


Figura D23 – Configuração final da superfície livre do escoamento para 896 m³/s na secção 3

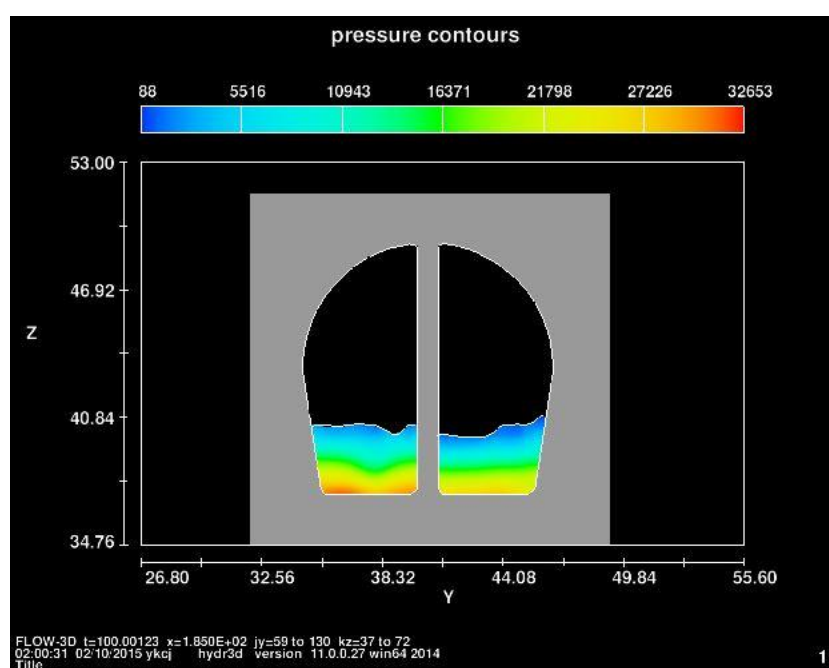


Figura D24 – Configuração final da superfície livre do escoamento para 896 m³/s na secção 4

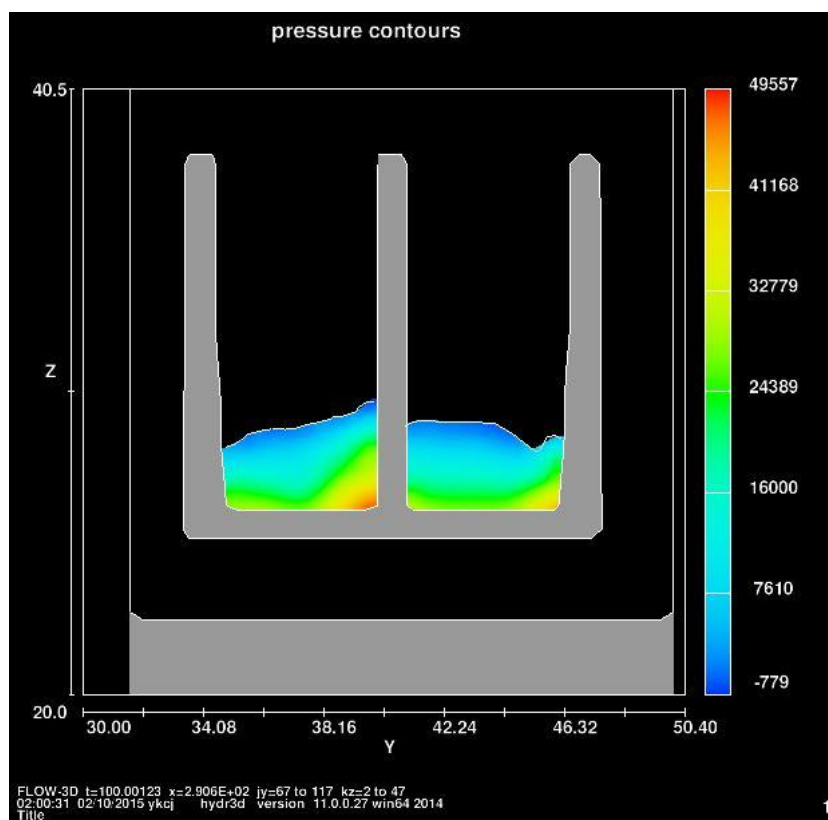


Figura D25 – Configuração final da superfície livre do escoamento para $896 \text{ m}^3/\text{s}$ na secção 5

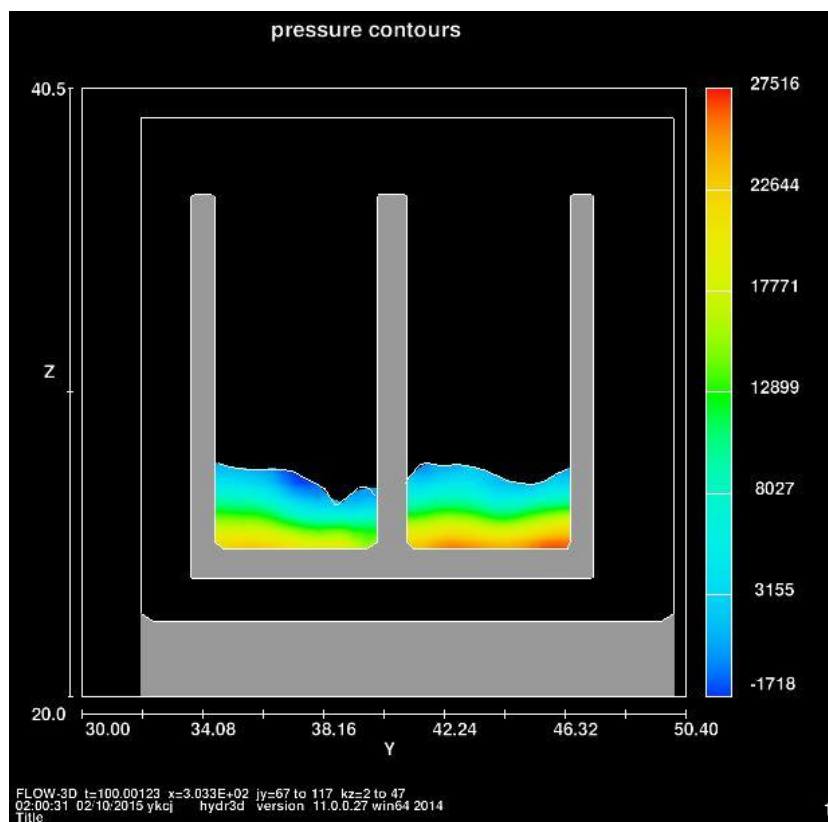


Figura D26 – Configuração final da superfície livre do escoamento para $896 \text{ m}^3/\text{s}$ na secção 6

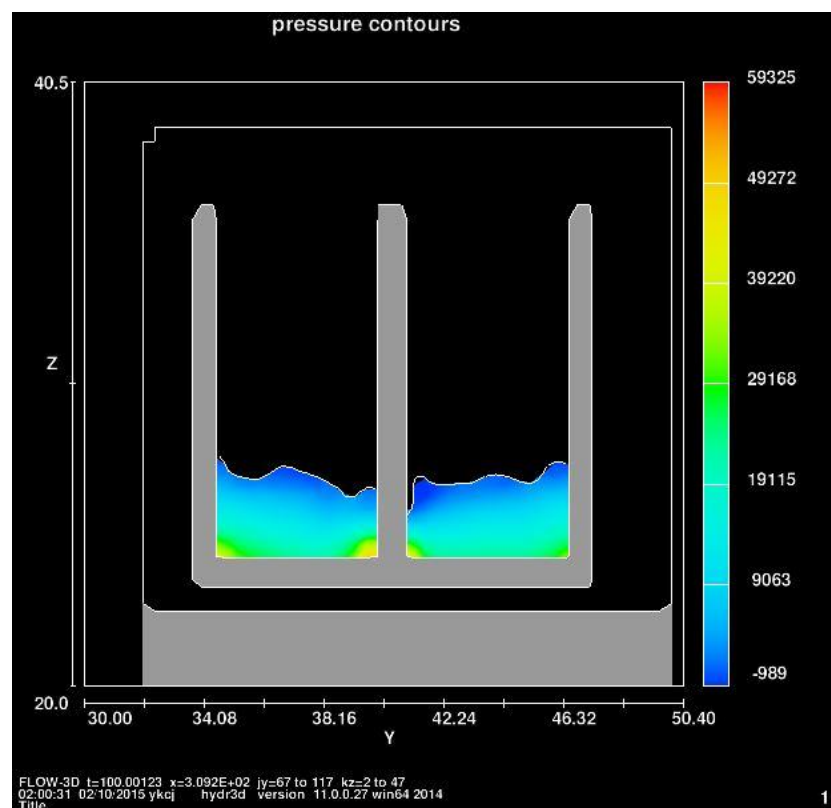


Figura D27 – Configuração final da superfície livre do escoamento para 896 m³/s na secção 7

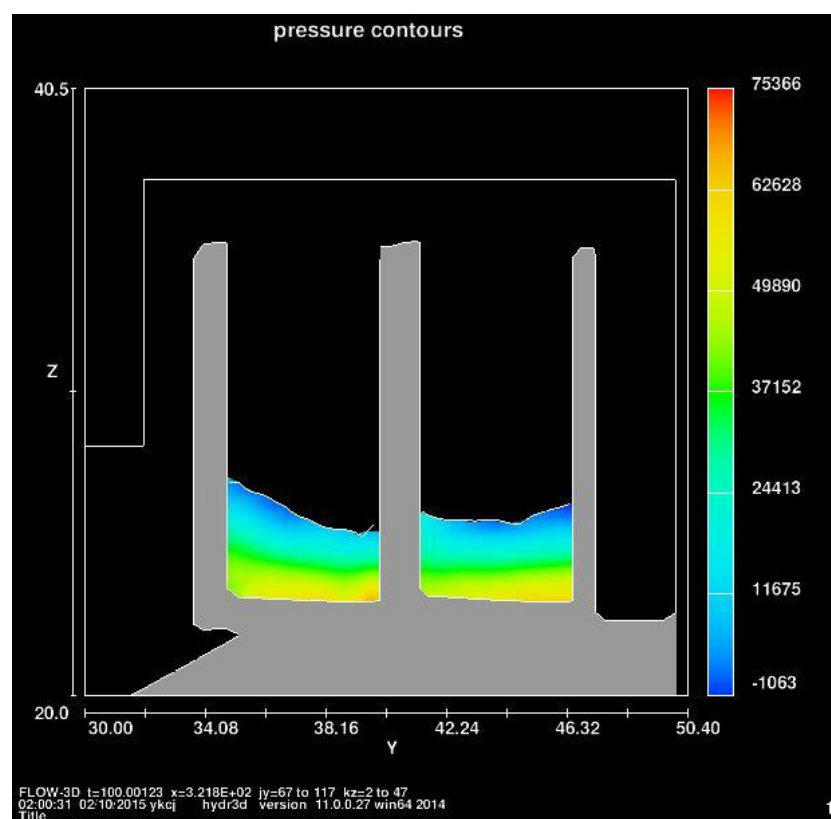


Figura D28 – Configuração final da superfície livre do escoamento para 896 m³/s na secção 8

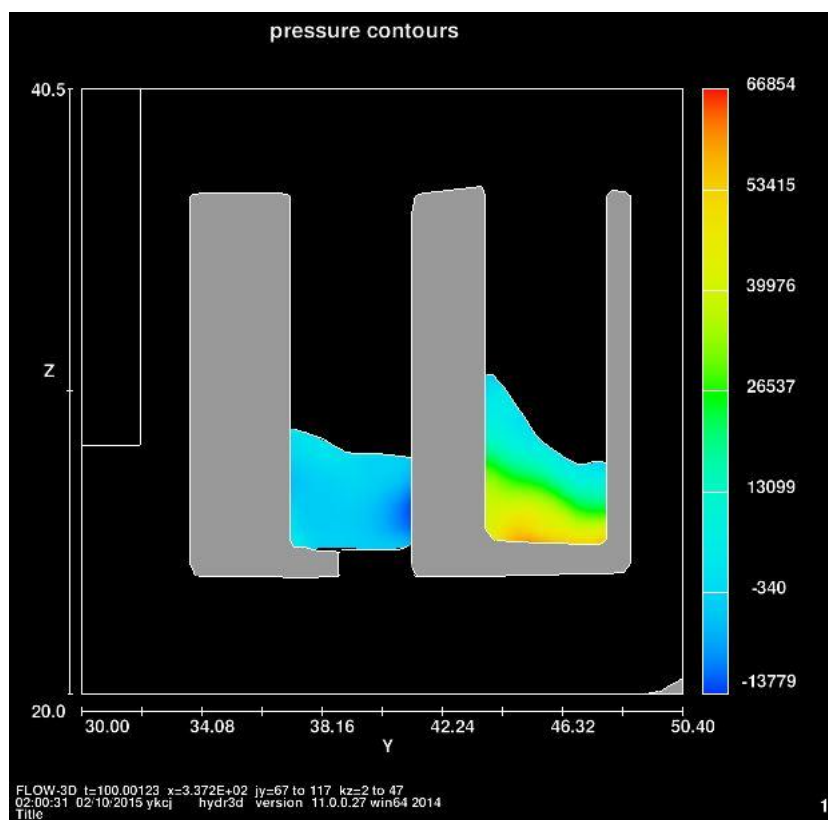


Figura D29 – Configuração final da superfície livre do escoamento para 896 m³/s na secção 9

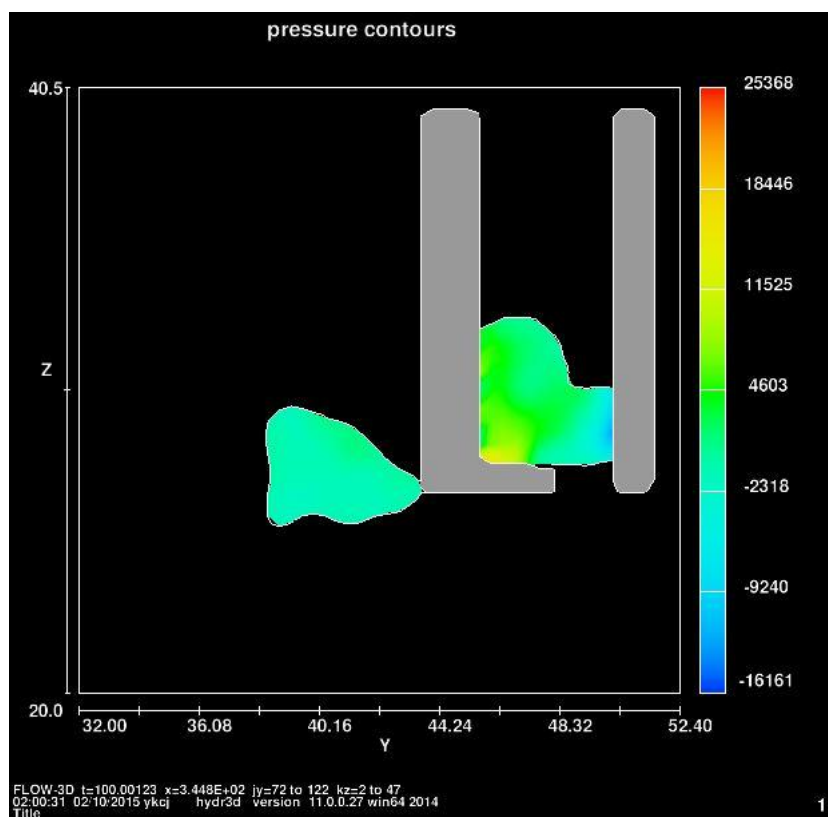


Figura D30 – Configuração final da superfície livre do escoamento para 896 m³/s na secção 10

D.2.3 CONFIGURAÇÃO FINAL PARA $Q = 527 \text{ m}^3/\text{s}$

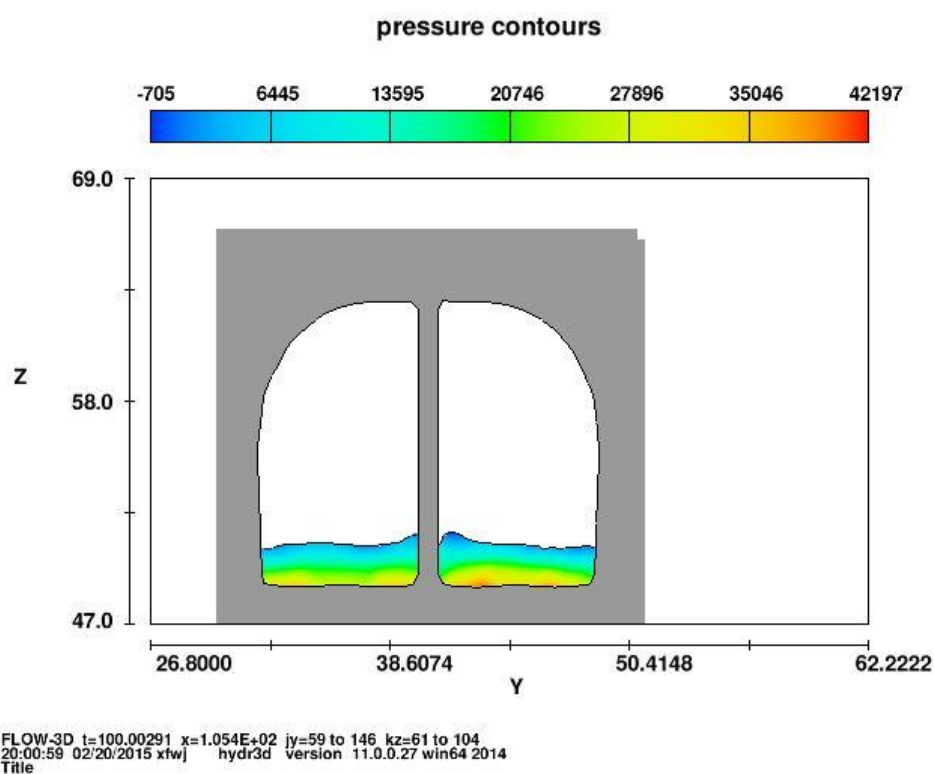


Figura D31 – Configuração final da superfície livre do escoamento para $527 \text{ m}^3/\text{s}$ na secção 1

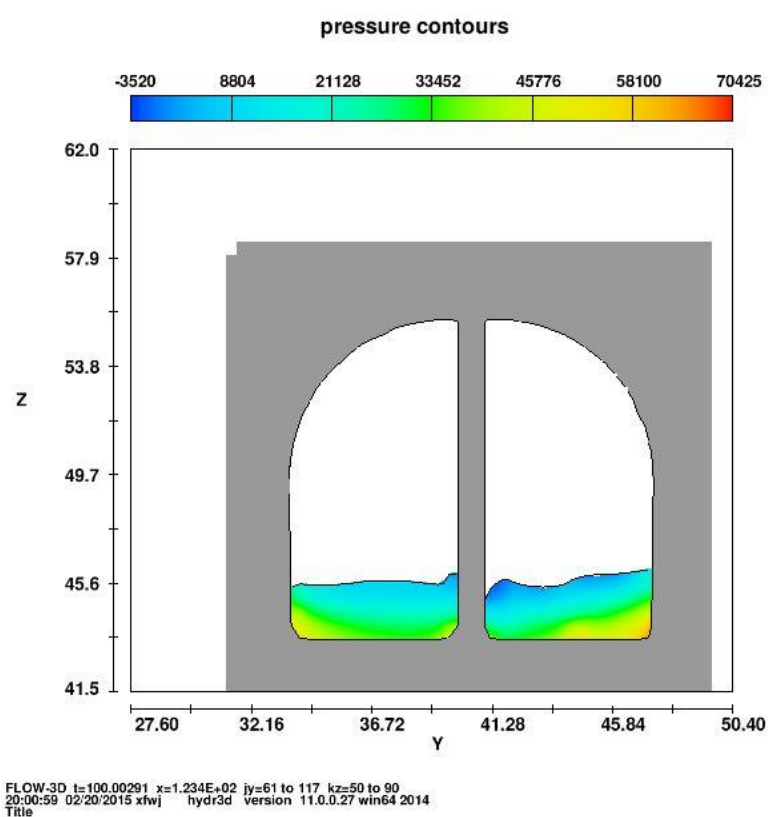
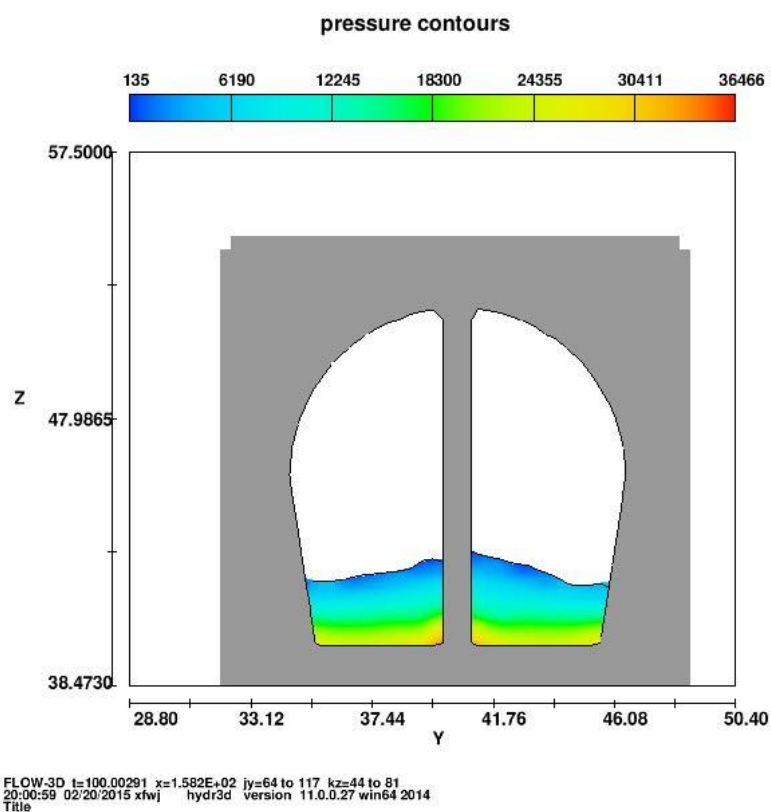
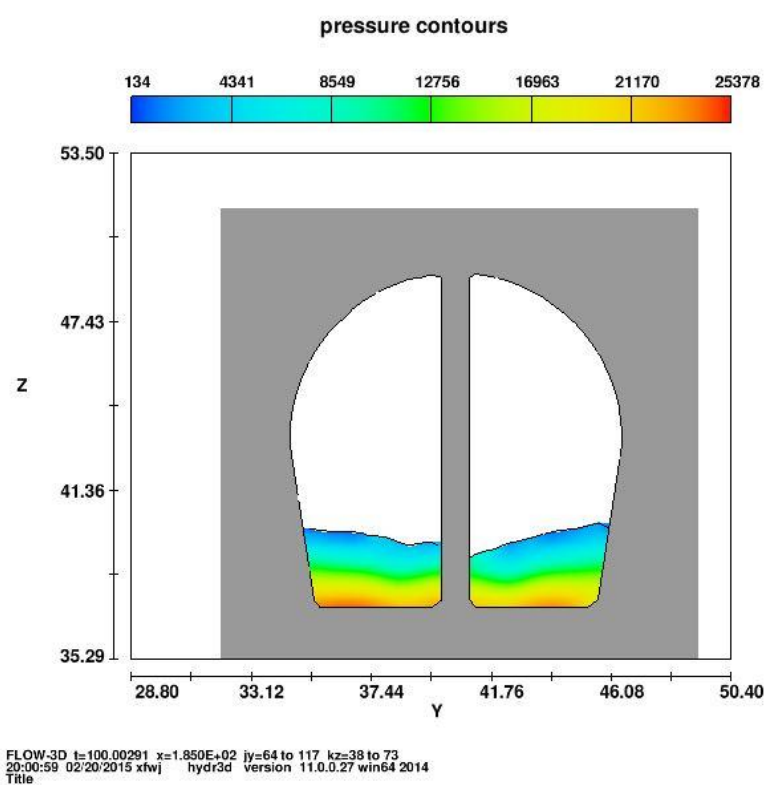


Figura D32 – Configuração final da superfície livre do escoamento para $527 \text{ m}^3/\text{s}$ na secção 2



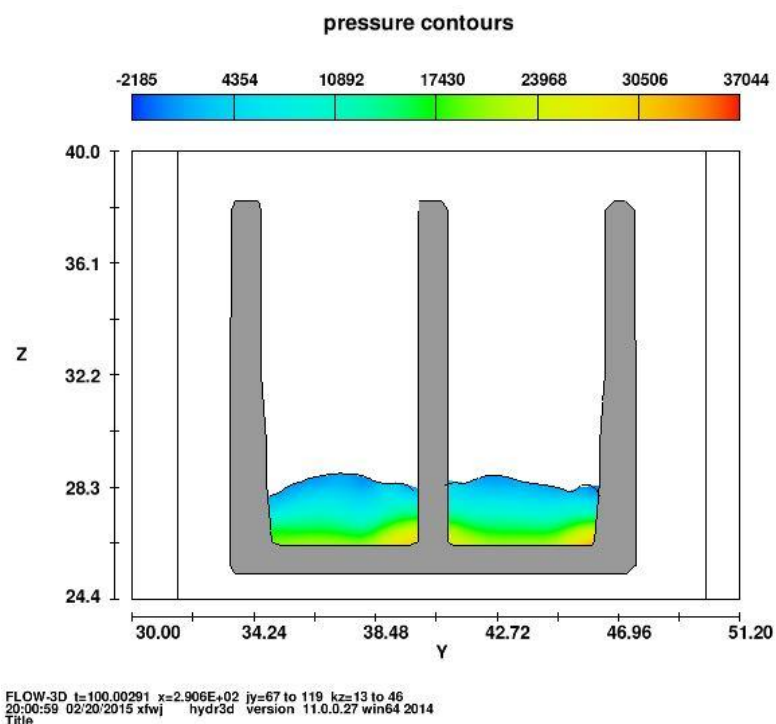
1

Figura D33 – Configuração final da superfície livre do escoamento para $527 \text{ m}^3/\text{s}$ na secção 3



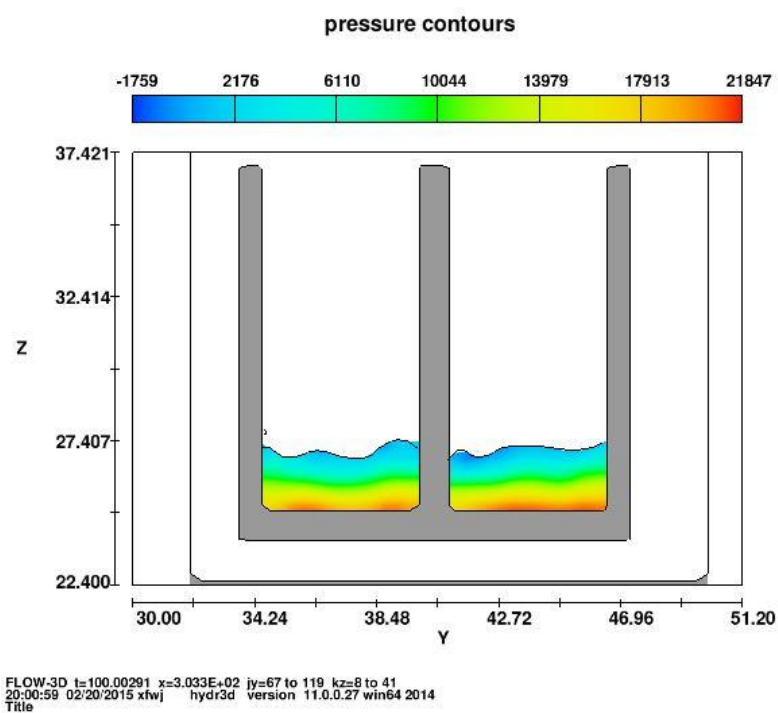
1

Figura D34 – Configuração final da superfície livre do escoamento para $527 \text{ m}^3/\text{s}$ na secção 4



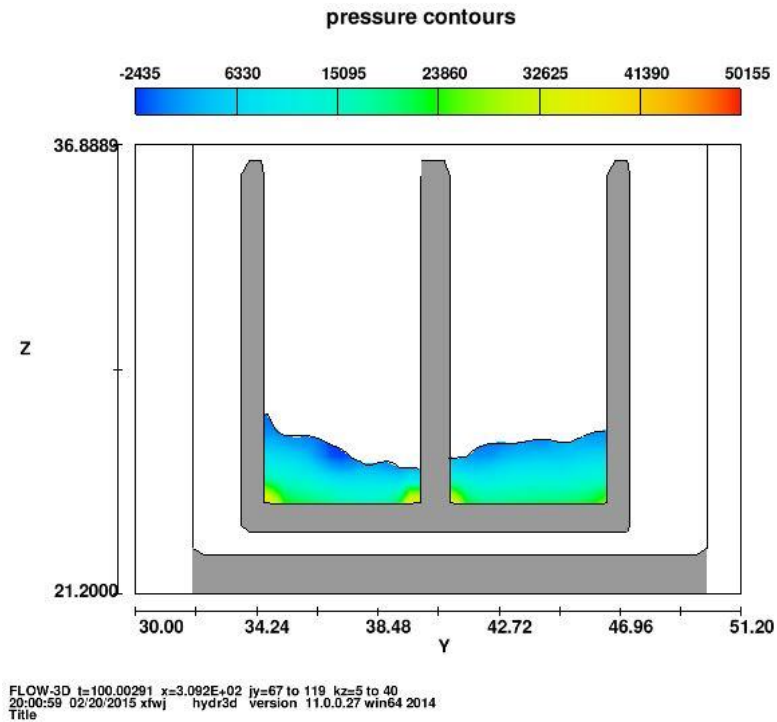
1

Figura D35 – Configuração final da superfície livre do escoamento para 527 m³/s na secção 5



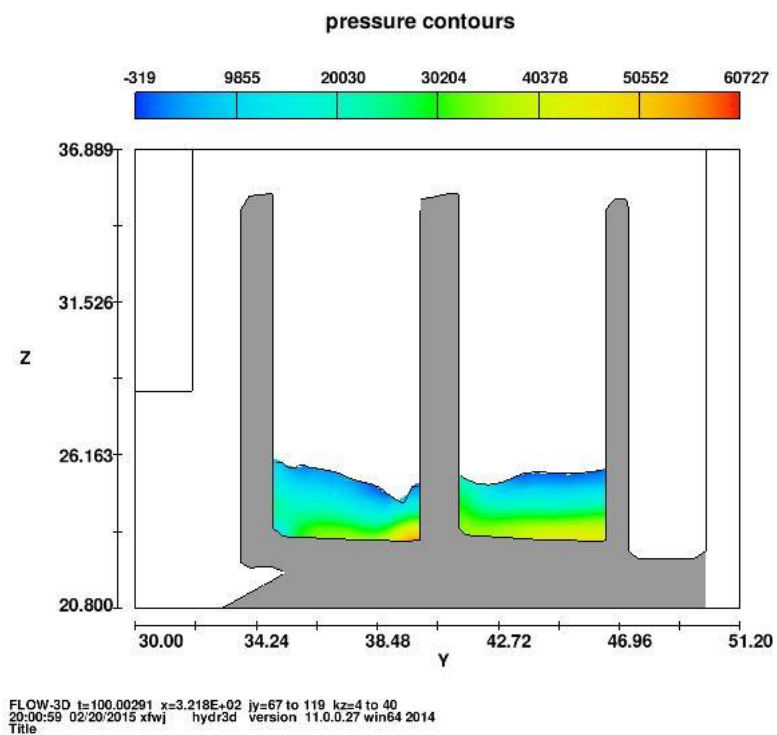
1

Figura D36 – Configuração final da superfície livre do escoamento para 527 m³/s na secção 6



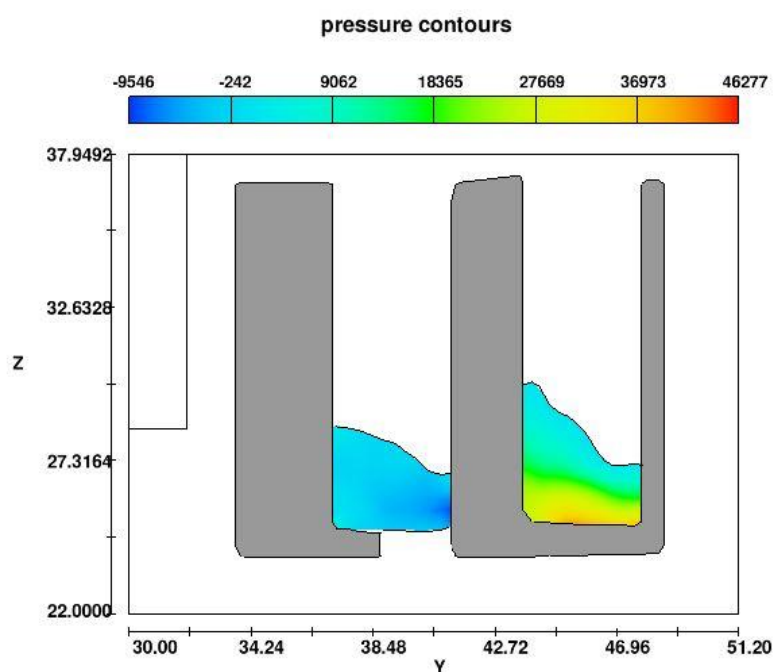
1

Figura D37 – Configuração final da superfície livre do escoamento para 527 m³/s na secção 7



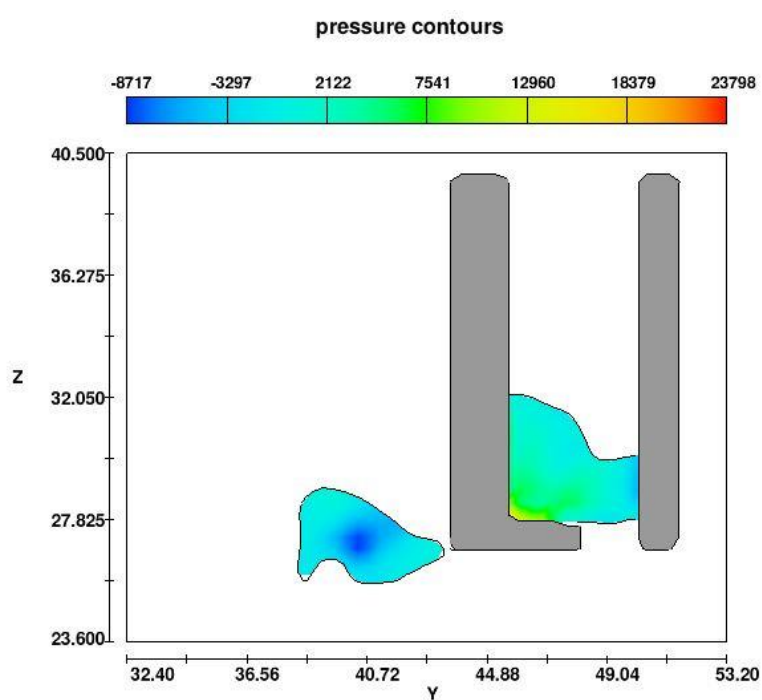
1

Figura D38 – Configuração final da superfície livre do escoamento para 527 m³/s na secção 8



1

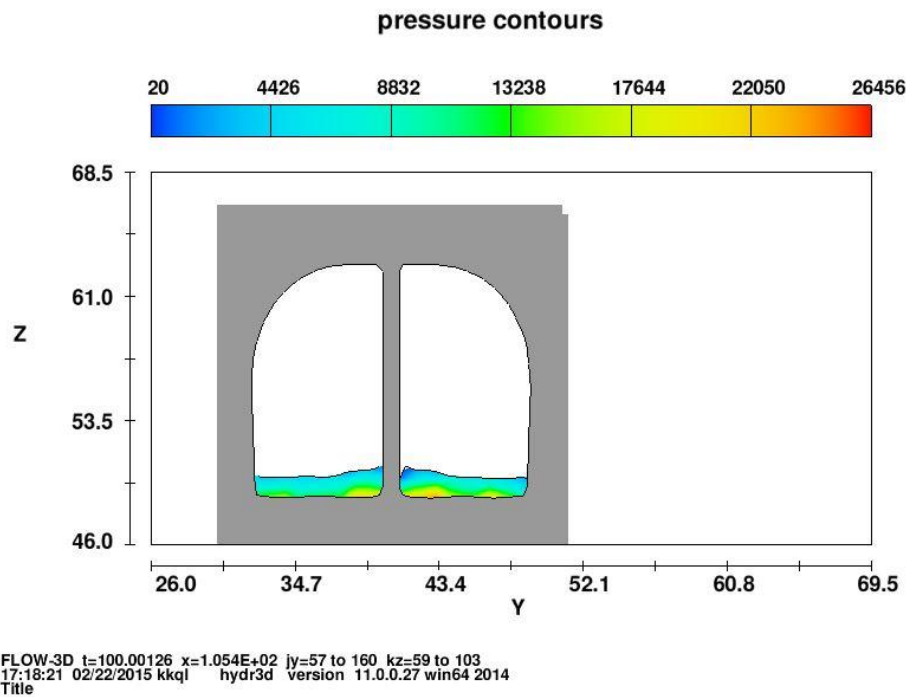
Figura D39 – Configuração final da superfície livre do escoamento para 527 m³/s na secção 9



1

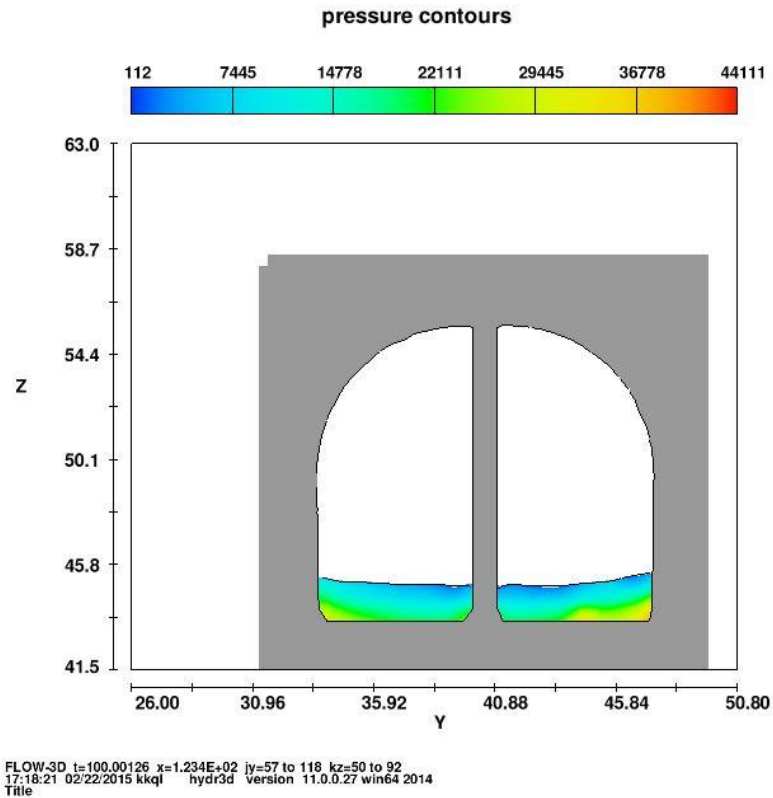
Figura D40 – Configuração final da superfície livre do escoamento para 527 m³/s na secção 10

D.2.4 CONFIGURAÇÃO FINAL PARA $Q = 303 \text{ m}^3/\text{s}$



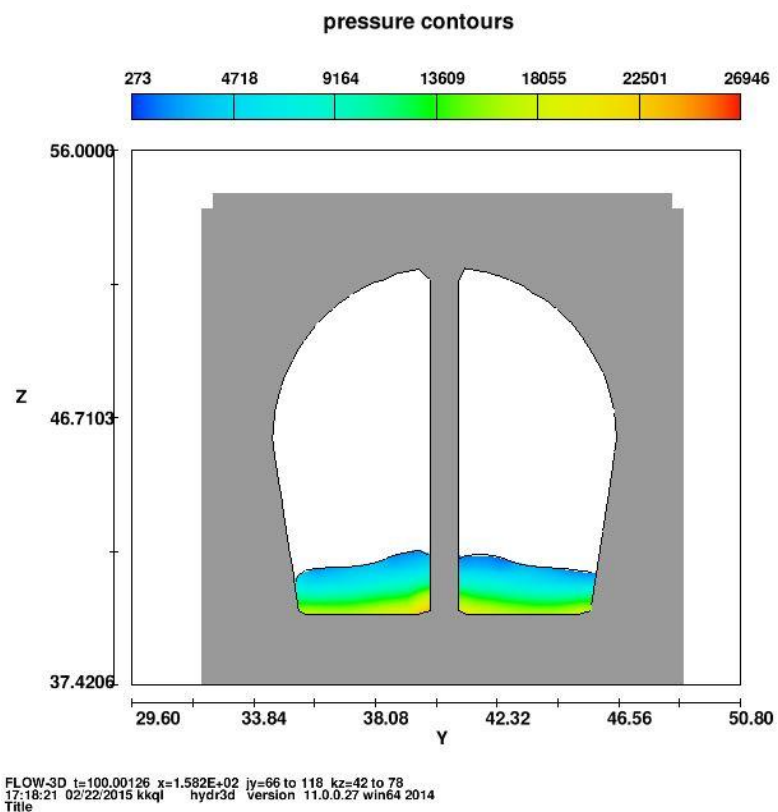
1

Figura D41 – Configuração final da superfície livre do escoamento para $303 \text{ m}^3/\text{s}$ na secção 1



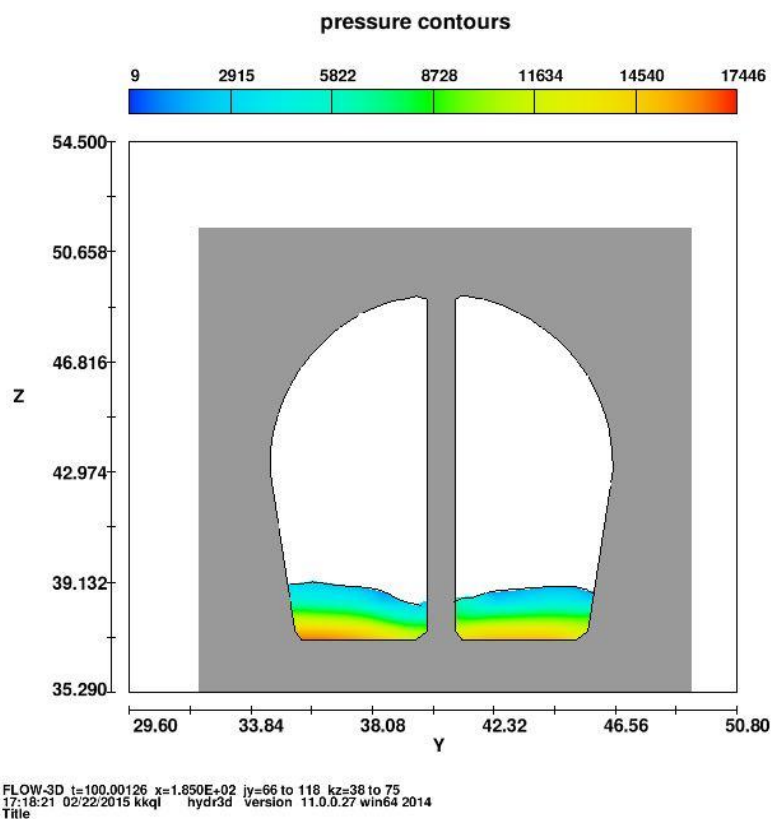
1

Figura D42 – Configuração final da superfície livre do escoamento para $303 \text{ m}^3/\text{s}$ na secção 2



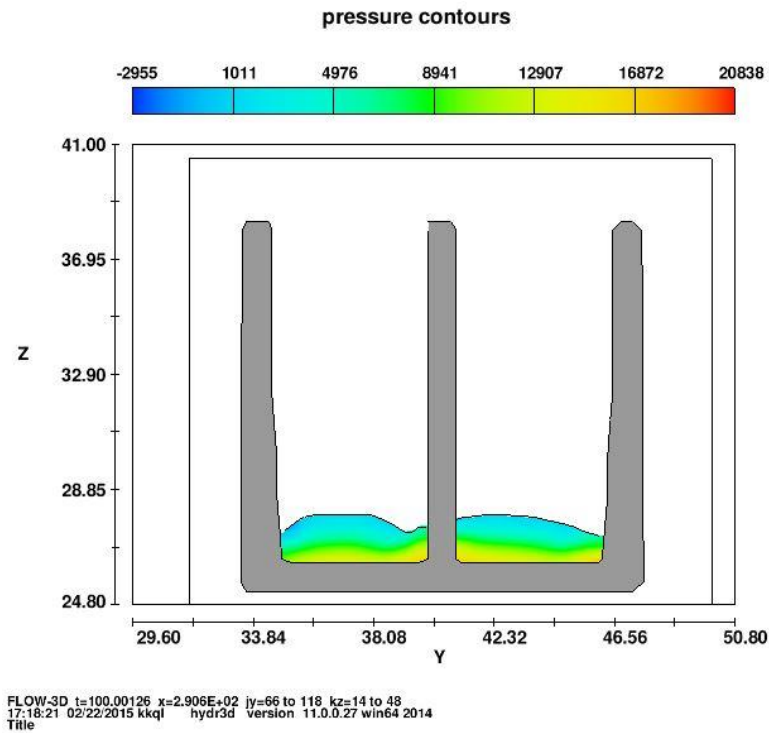
1

Figura D43 – Configuração final da superfície livre do escoamento para 303 m³/s na secção 3



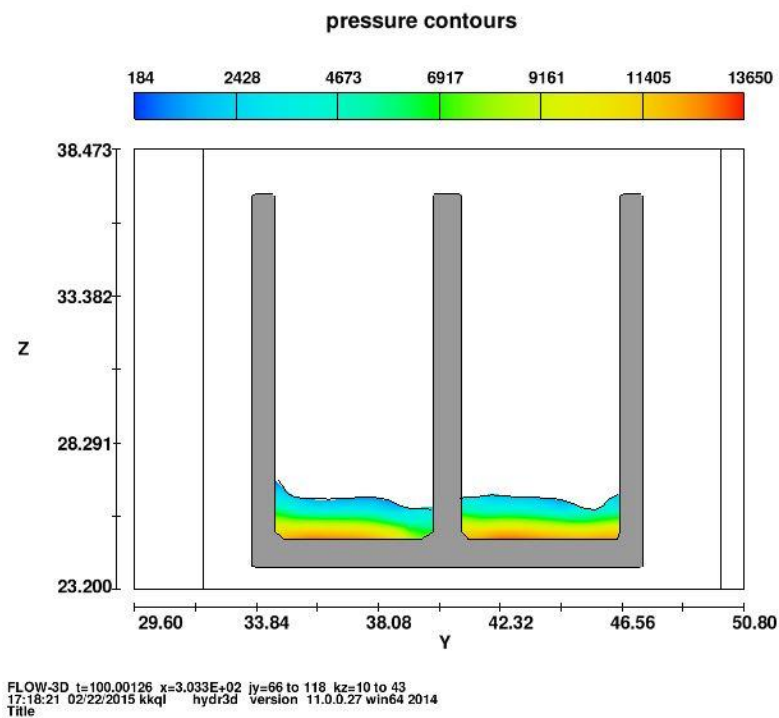
1

Figura D44 – Configuração final da superfície livre do escoamento para 303 m³/s na secção 4



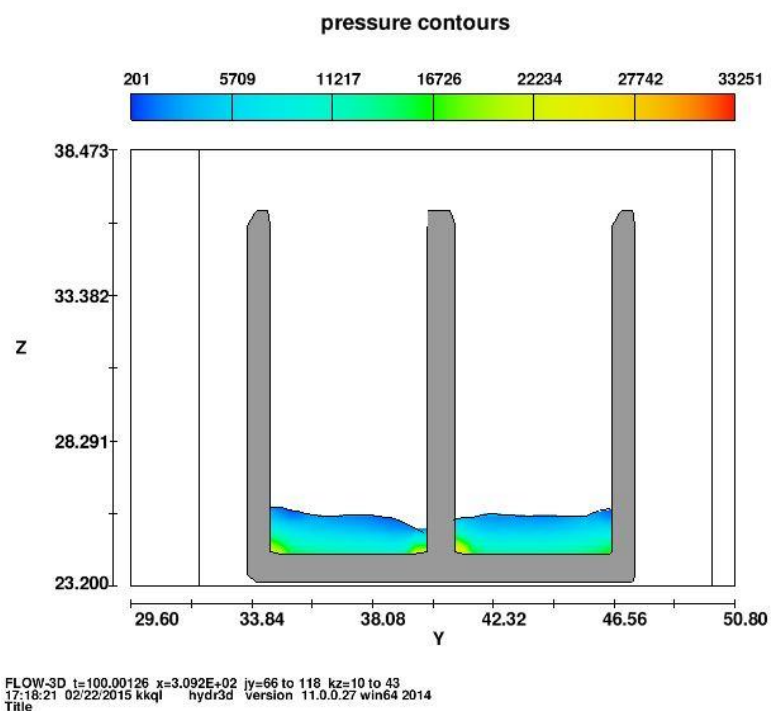
1

Figura D45 – Configuração final da superfície livre do escoamento para 303 m³/s na secção 5



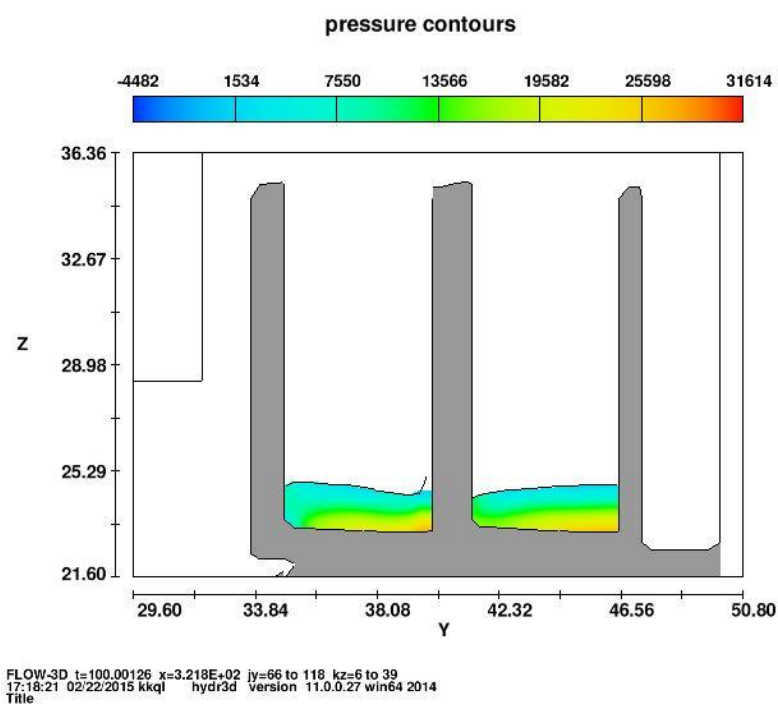
1

Figura D46 – Configuração final da superfície livre do escoamento para 303 m³/s na secção 6



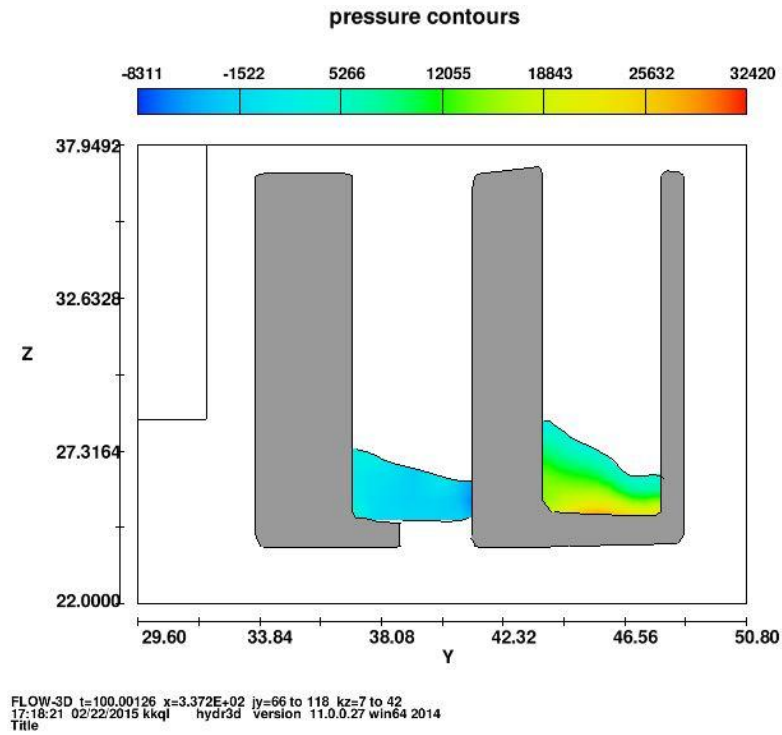
1

Figura D47 – Configuração final da superfície livre do escoamento para 303 m³/s na secção 7



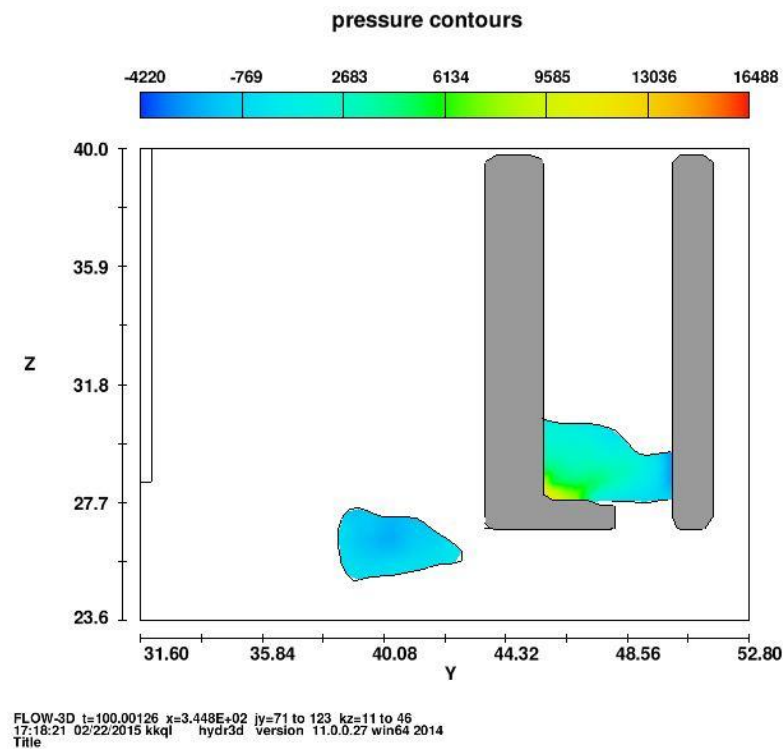
1

Figura D48 – Configuração final da superfície livre do escoamento para 303 m³/s na secção 8



1

Figura D49 – Configuração final da superfície livre do escoamento para 303 m³/s na secção 9



1

Figura D50 – Configuração final da superfície livre do escoamento para 303 m³/s na secção 10

D.3 IMAGENS DAS VELOCIDADES NAS DIFERENTES SECÇÕES DE MEDIÇÃO

Nas diferentes secções de medição foram extraídas as configurações da distribuição das velocidades no escoamento. Essas imagens são apresentadas de seguida ressaltando-se que as imagens apresentadas correspondem à vista de jusante para montante sendo as imagens apresentadas invertidas, ou seja, o vão direito corresponde ao vão apresentado do lado esquerdo da imagem e vice-versa. São também apresentados ambos os vãos para todas as secções de medição embora a medição não tenha sido efetuada em todos.

D.3.1 IMAGENS DA DISTRIBUIÇÃO DAS VELOCIDADES PARA O CAUDAL DE 2062 M³/S

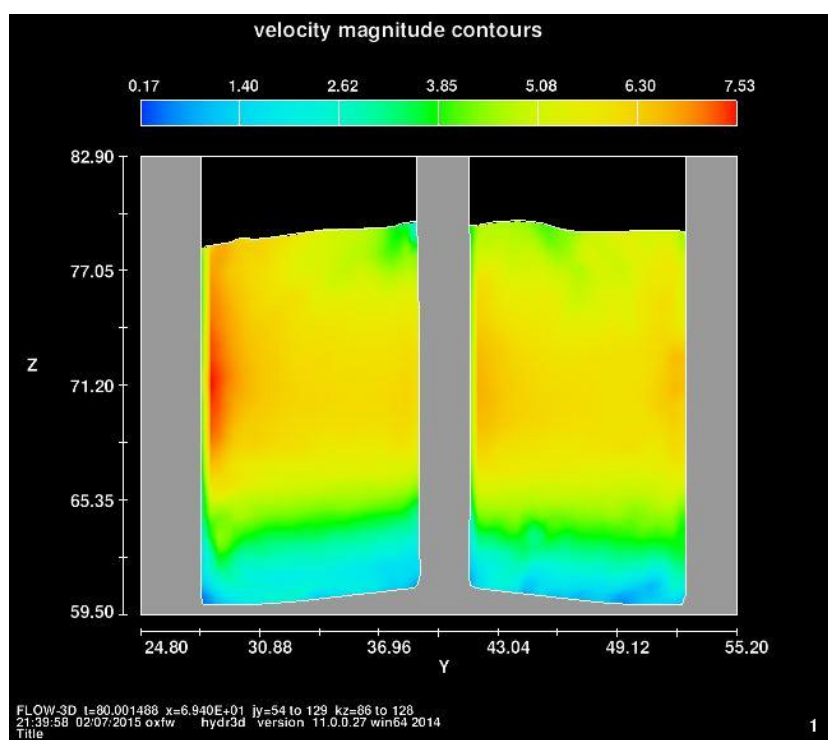


Figura D51 – Distribuição de velocidades para a secção v1 e caudal de 2062 m³/s

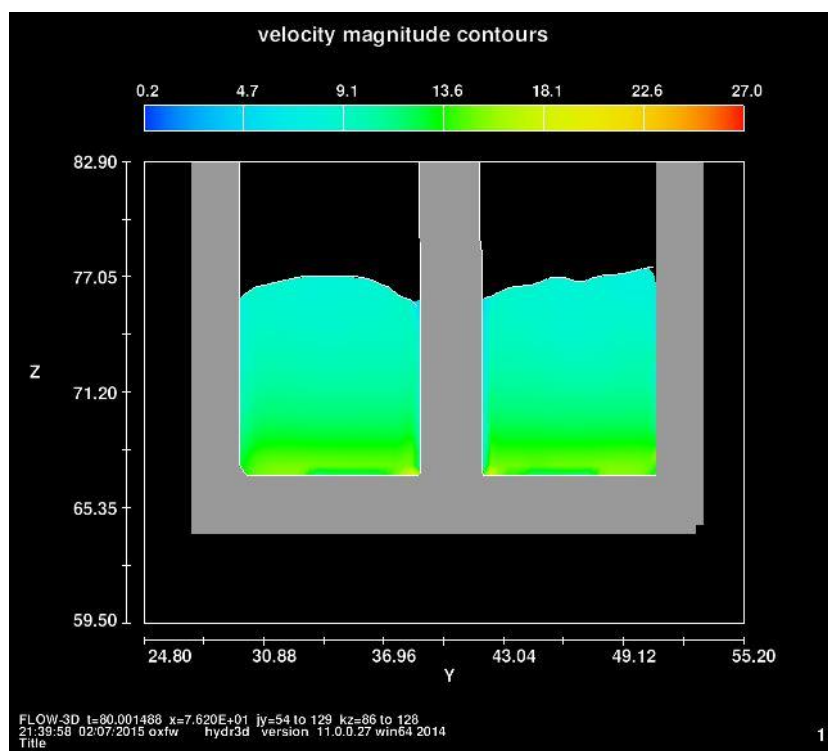


Figura D52 – Distribuição de velocidades para a secção v2 e caudal de 2062 m³/s

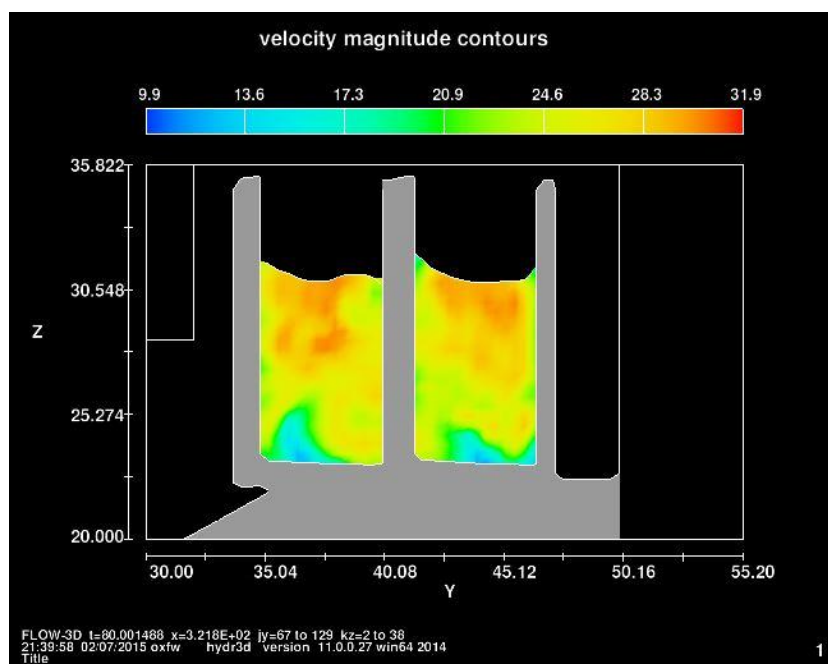


Figura D53 – Distribuição de velocidades para a secção v3 e caudal de 2062 m³/s

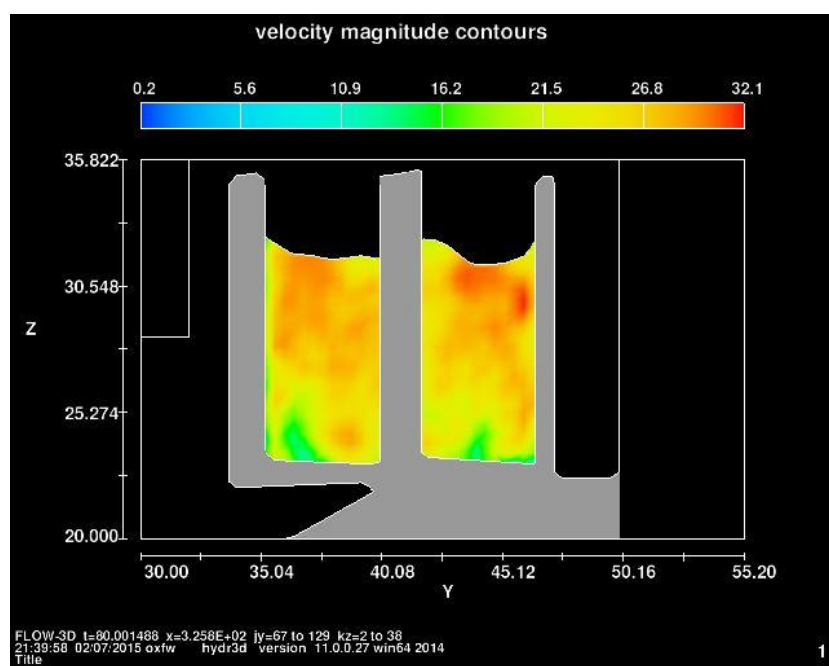


Figura D54 – Distribuição de velocidades para a secção v4 e caudal de 2062 m³/s

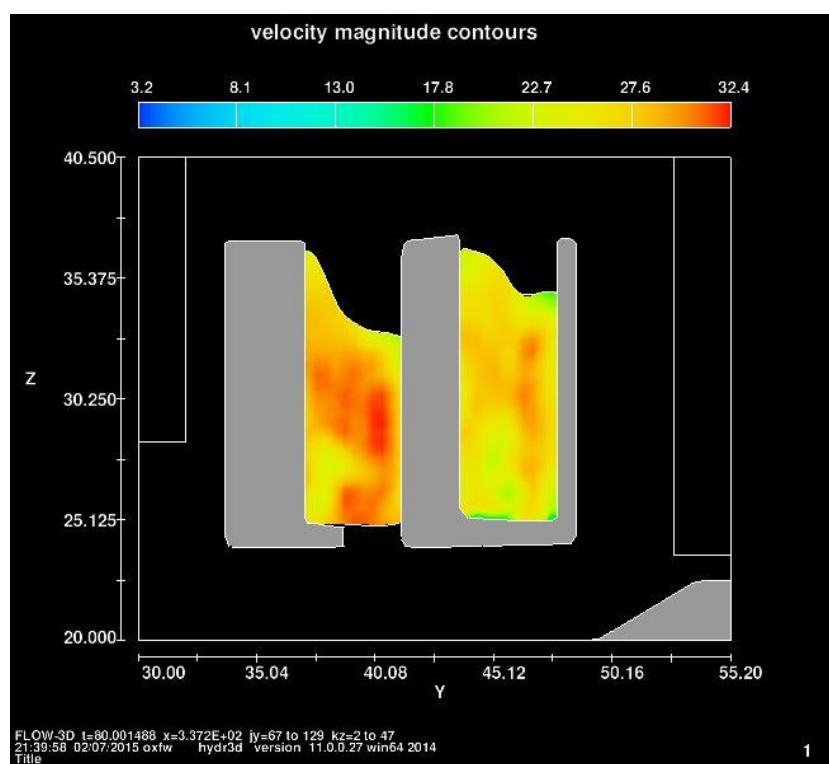


Figura D55 – Distribuição de velocidades para a secção v5 e caudal de 2062 m³/s

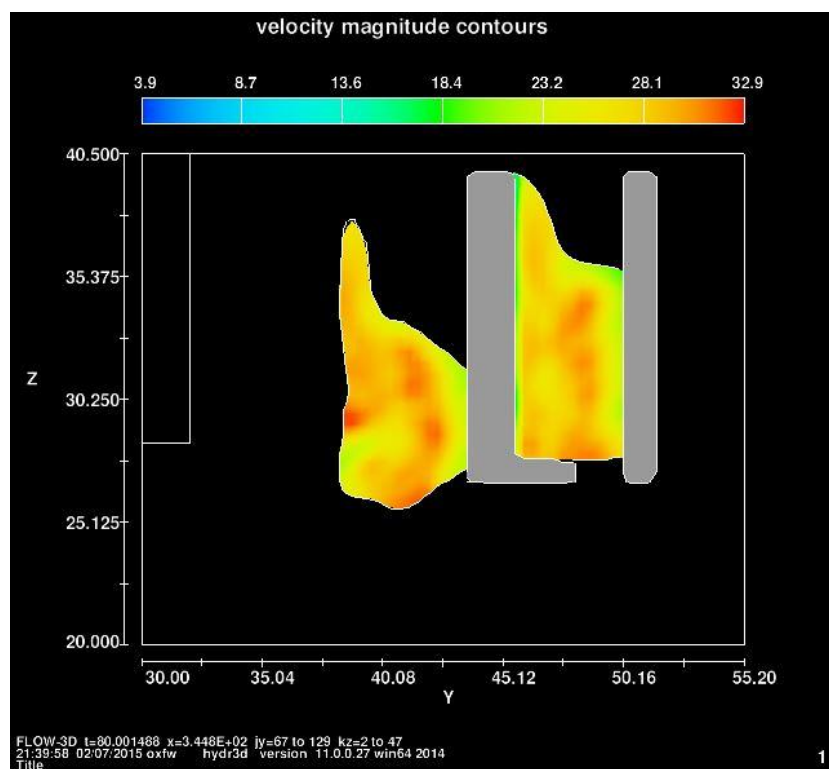


Figura D56 – Distribuição de velocidades para a secção v6 e caudal de 2062 m³/s

D.3.2 IMAGENS DA DISTRIBUIÇÃO DAS VELOCIDADES PARA O CAUDAL DE 896 M³/S

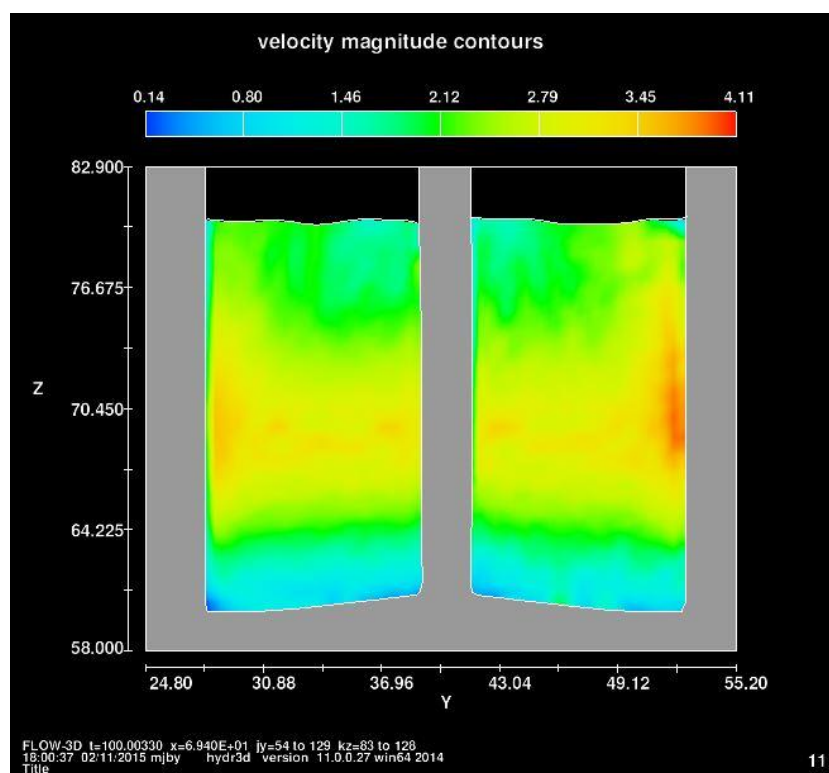


Figura D57 – Distribuição de velocidades para a secção v1 e caudal de 896 m³/s

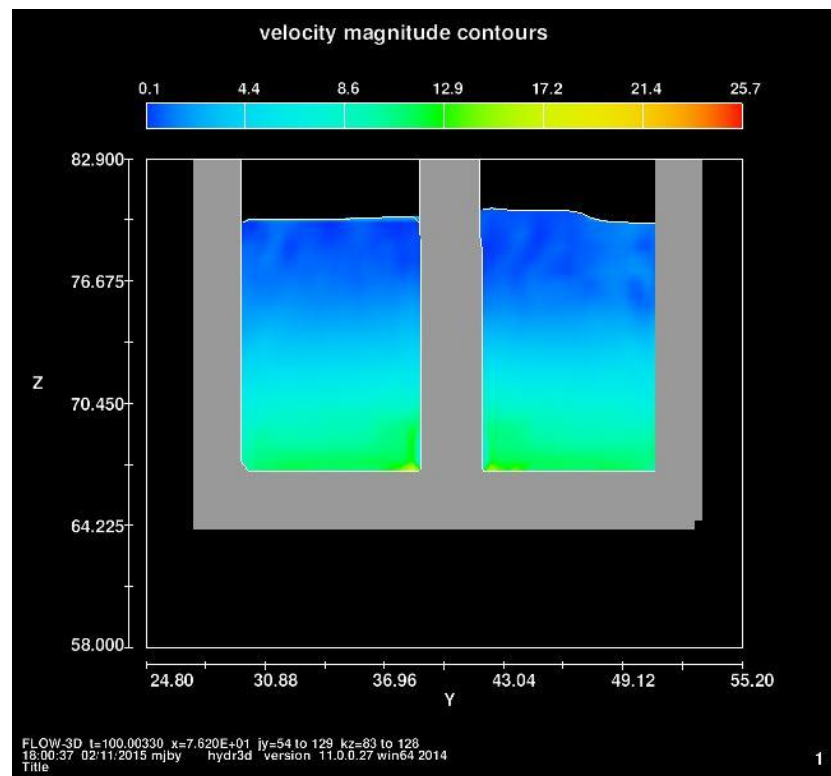


Figura D58 – Distribuição de velocidades para a secção v2 e caudal de 896 m³/s

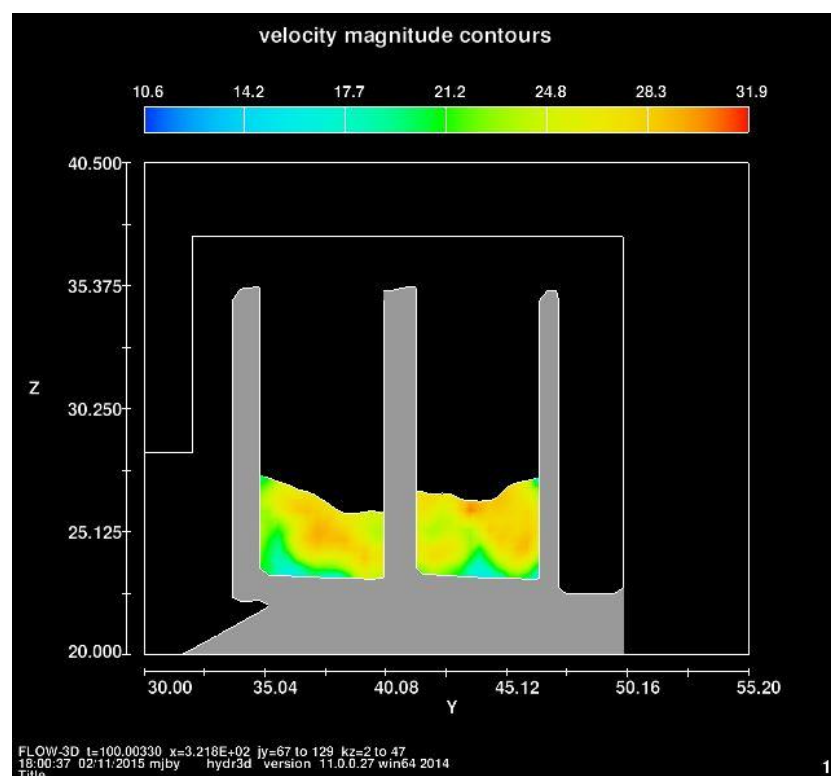


Figura D59 – Distribuição de velocidades para a secção v3 e caudal de 896 m³/s

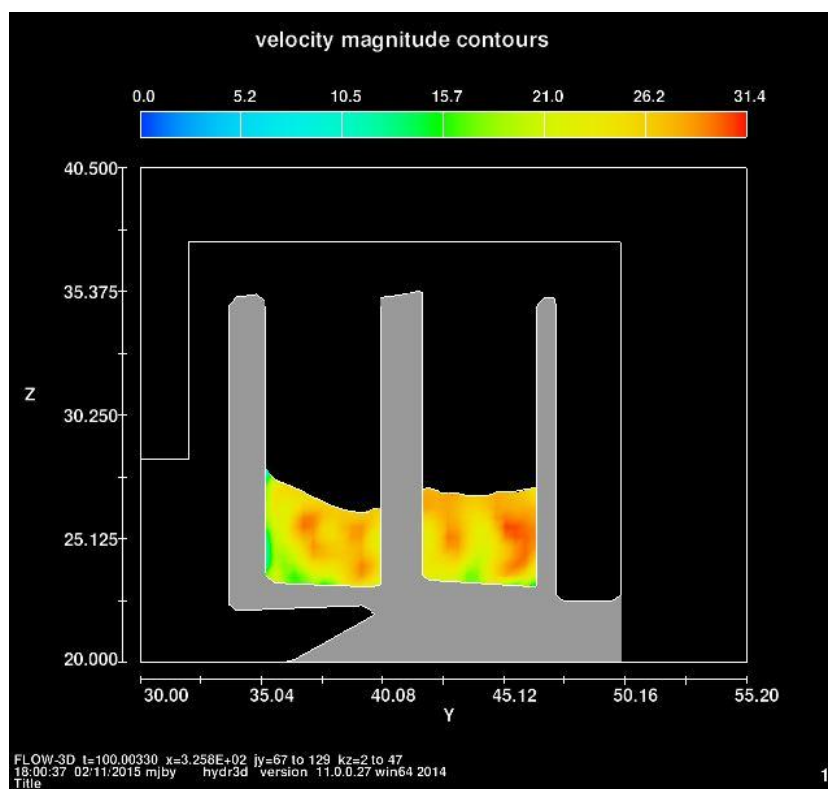


Figura D60 – Distribuição de velocidades para a secção v4 e caudal de 896 m³/s

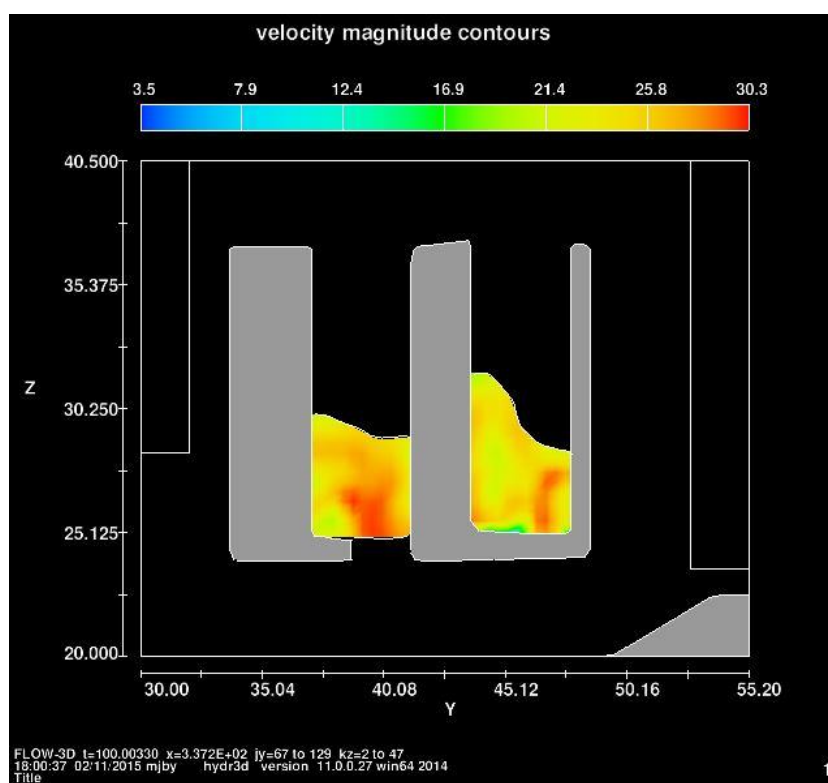


Figura D61 – Distribuição de velocidades para a secção v5 e caudal de 896 m³/s

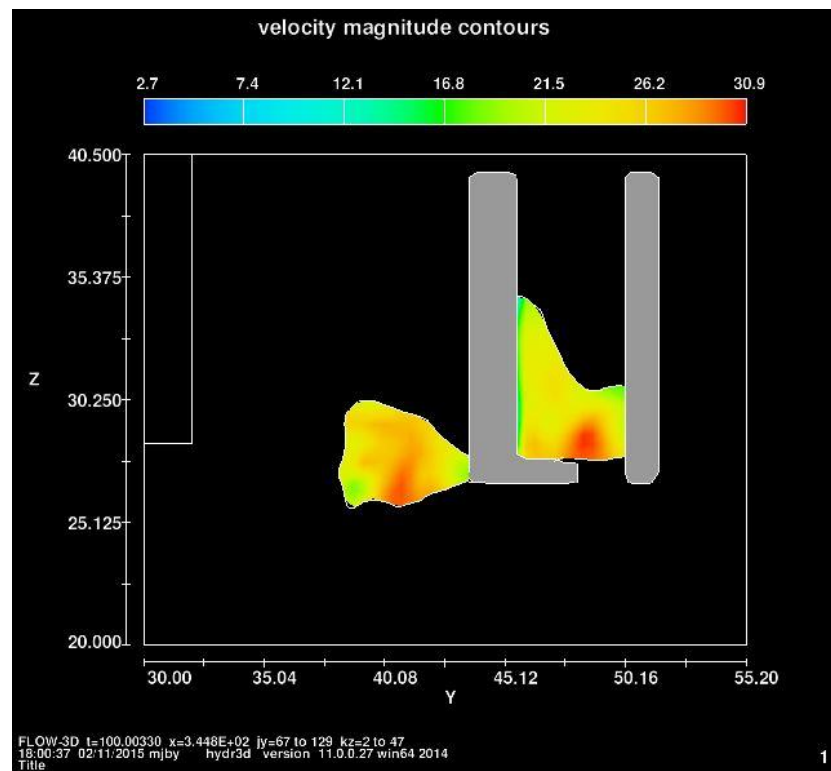


Figura D62 – Distribuição de velocidades para a secção v6 e caudal de 896 m³/s

D.4 CONFIGURAÇÃO FINAL DO JATO

O modo de obtenção do alcance do jato foi desenvolvido com recurso à obtenção de imagens finais do escoamento. As imagens extraídas apresentam uma escala de cores correspondente à gama de velocidades na direção X. Esta opção pela escala de cores tem que ver com a melhor delimitação do final do jato, dado que aquando do impacto do jato com o leito do rio existe uma alteração substancial da velocidade segundo a direção X. São apresentadas, seguidamente as imagens correspondentes ao alcance do jato para os diferentes caudais.

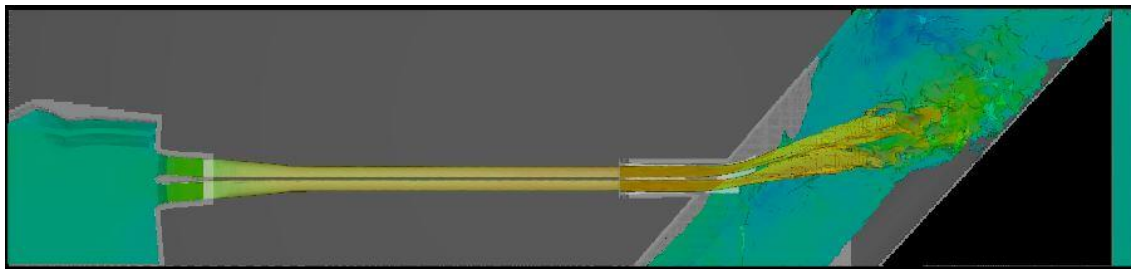


Figura D63 – Alcance do jato na simulação numérica para o caudal de 2062 m³/s

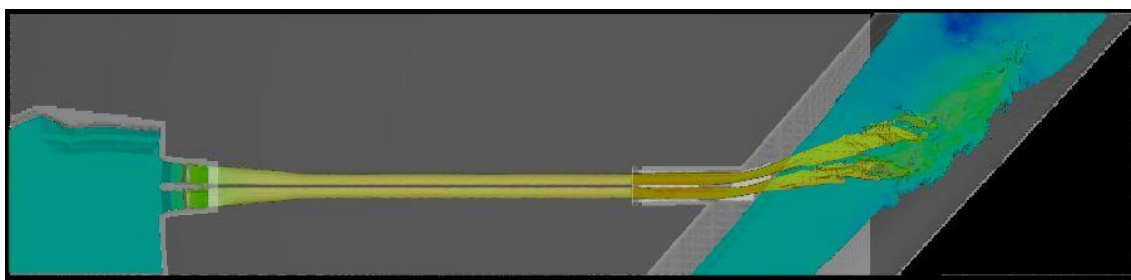


Figura D64 – Alcance do jato na simulação numérica para o caudal de 896 m³/s

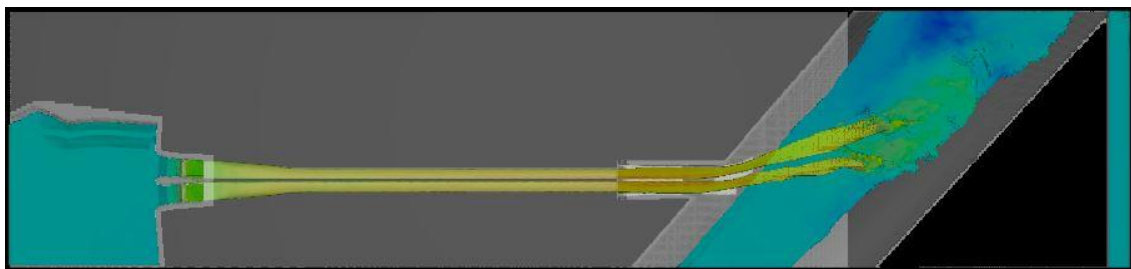


Figura D65 – Alcance do jato na simulação numérica para o caudal de 690 m³/s

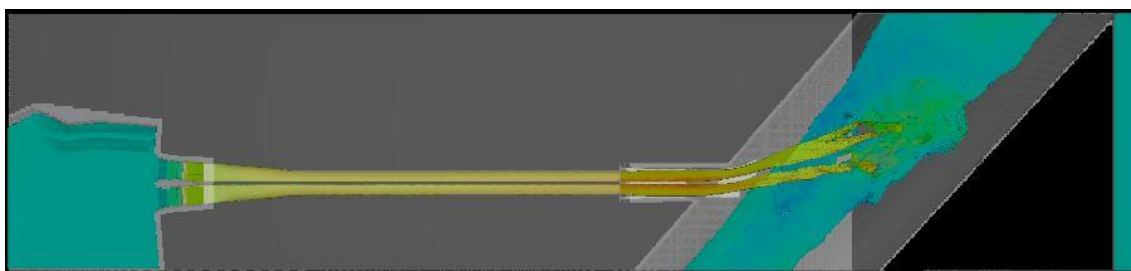


Figura D66 – Alcance do jato na simulação numérica para o caudal de 527 m³/s

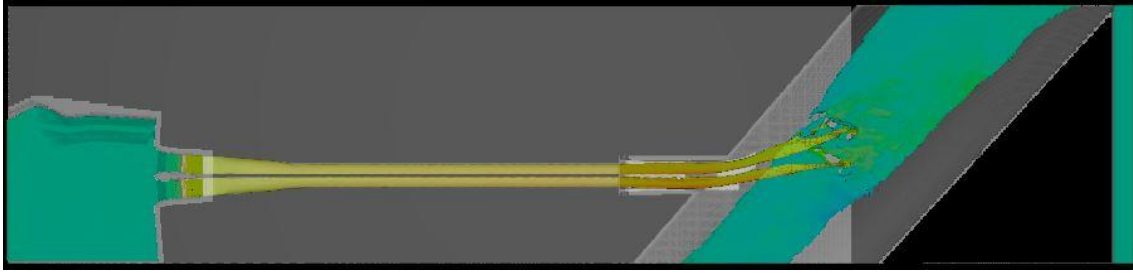


Figura D67 – Alcance do jato na simulação numérica para o caudal de 303 m³/s

Anexo E

Modelação numérica 3D de escoamentos em descarregadores de cheia.

Aplicação ao descarregador de cheias complementar do aproveitamento hidroelétrico da Caniçada.

E.1 COMPARAÇÃO GRÁFICA DAS ALTURAS DE ESCOAMENTO

E.1.1 COMPARAÇÃO GRÁFICA DAS ALTURAS DE ESCOAMENTO PARA O CAUDAL DE 690 M³/S

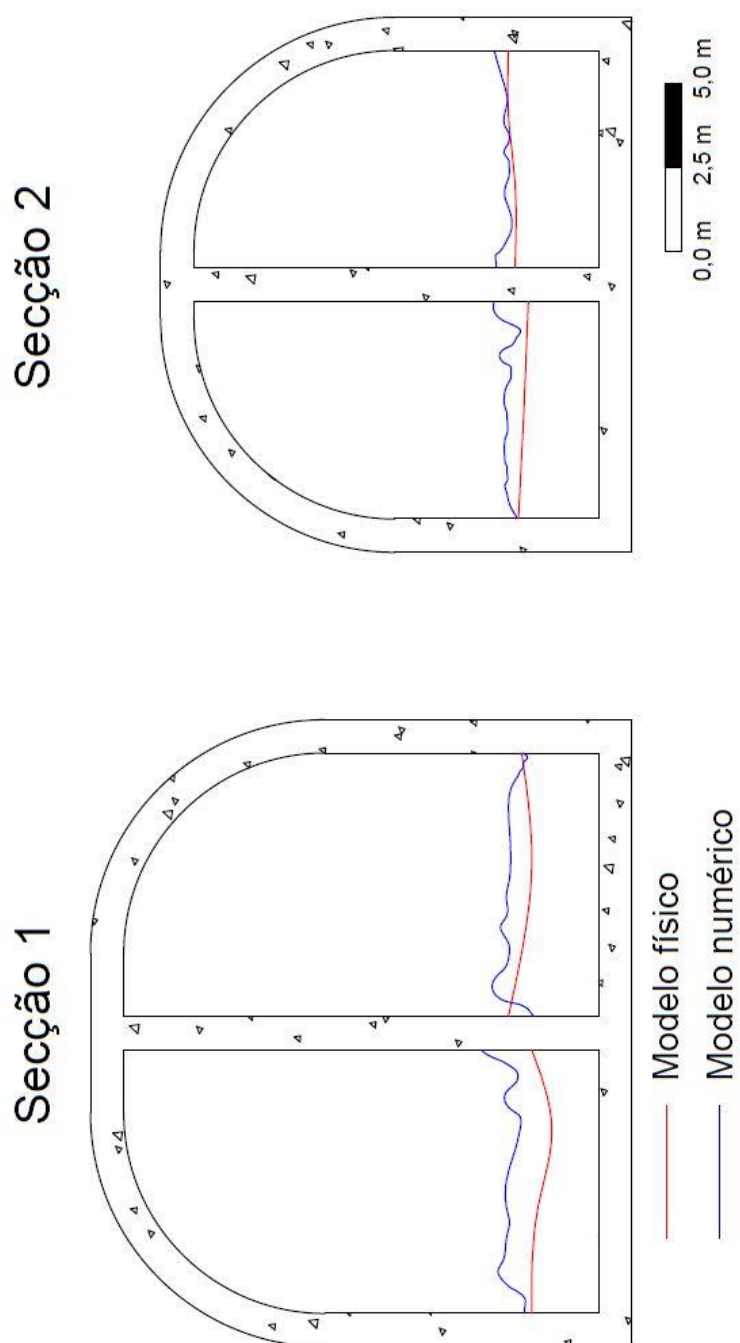


Figura E1 – Comparação de alturas de escoamento para o caudal de 690 m³/s nas secções 1 e 2

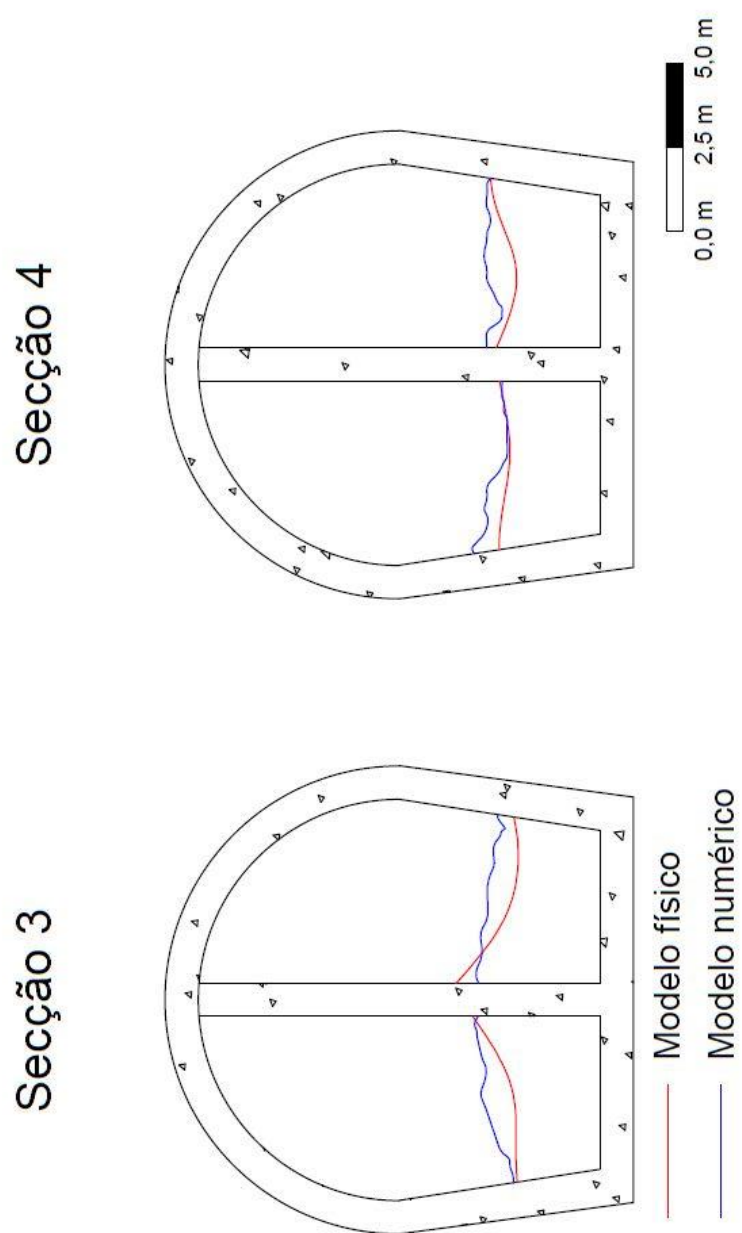


Figura E2 – Comparação de alturas de escoamento para o caudal de $690 \text{ m}^3/\text{s}$ nas secções 3 e 4

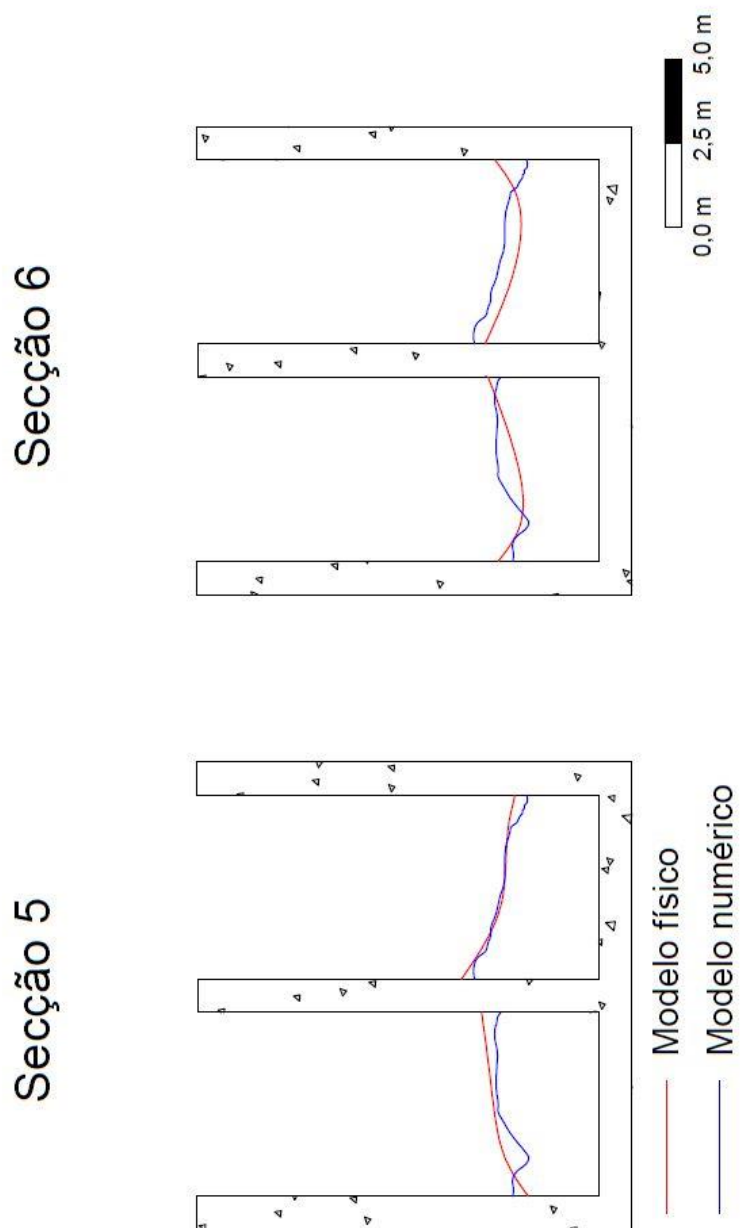


Figura E3 – Comparação de alturas de escoamento para o caudal de $690 \text{ m}^3/\text{s}$ nas secções 5 e 6

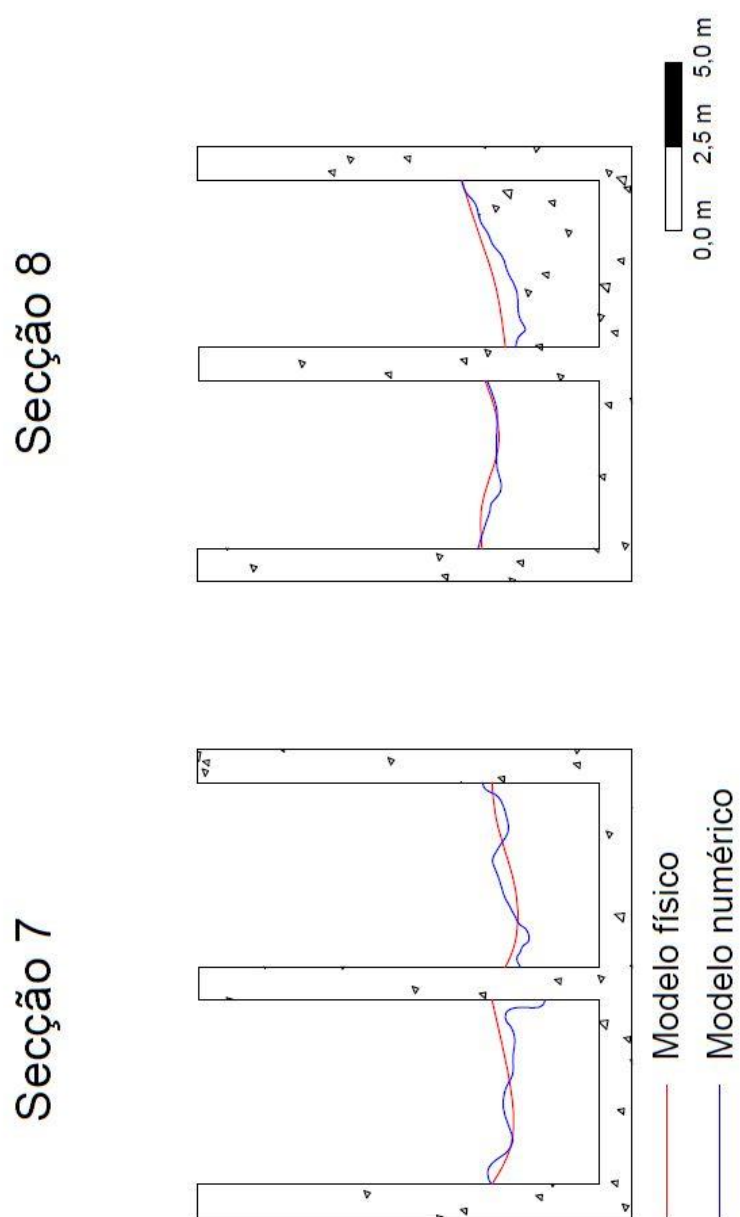


Figura E4 – Comparação de alturas de escoamento para o caudal de $690 \text{ m}^3/\text{s}$ nas secções 7 e 8

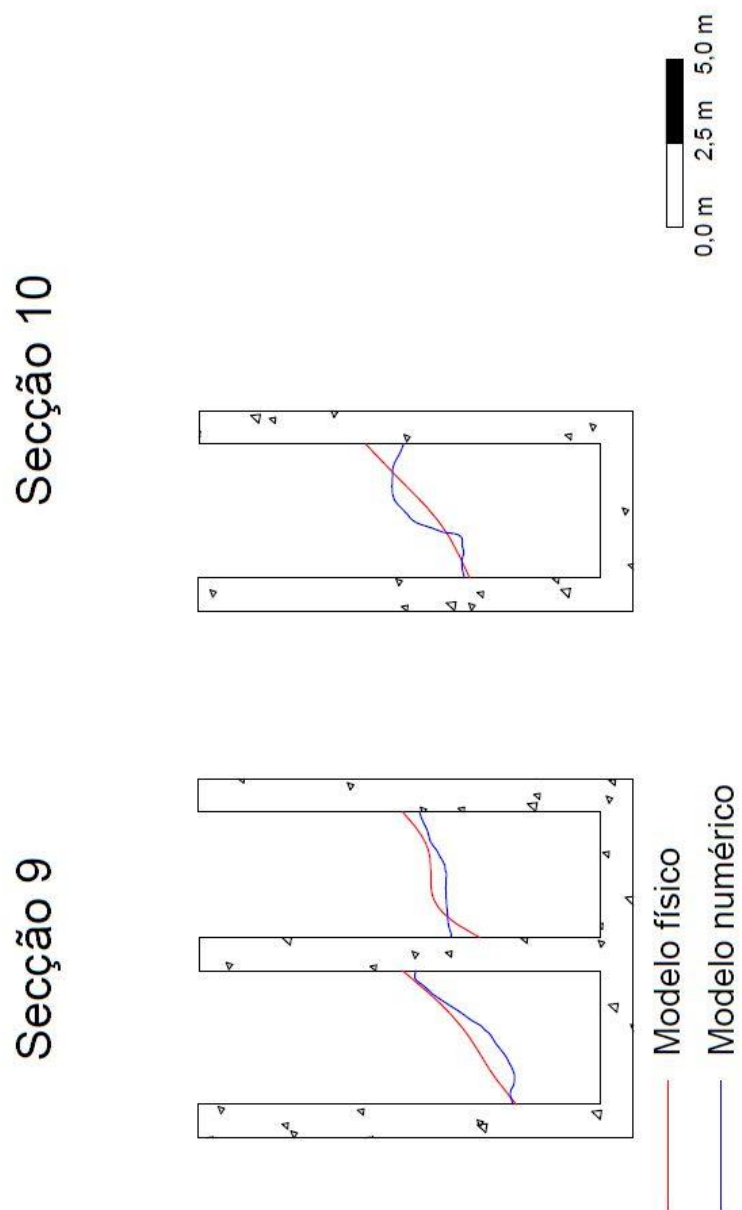


Figura E5 – Comparação de alturas de escoamento para o caudal de $690 \text{ m}^3/\text{s}$ nas secções 9 e 10

E.1.2 COMPARAÇÃO GRÁFICA DAS ALTURAS DE ESCOAMENTO PARA O CAUDAL DE 527 M³/S

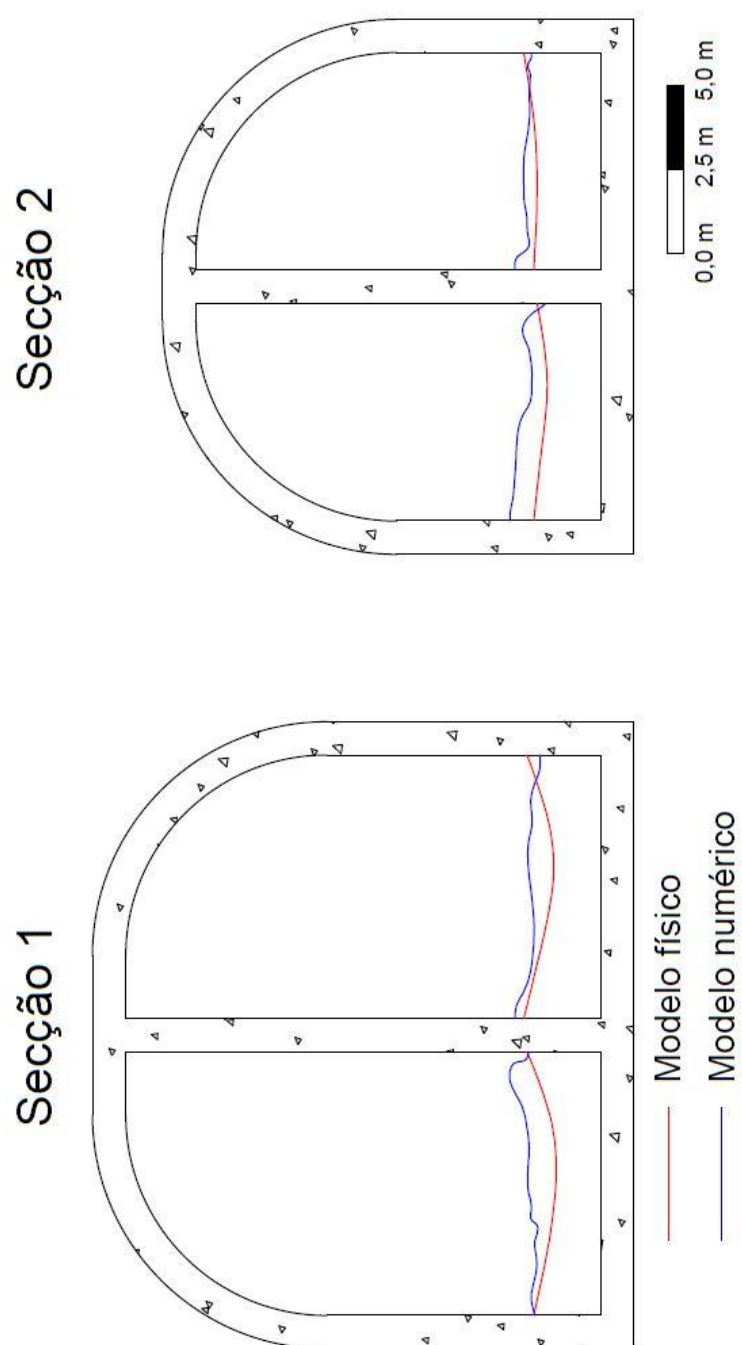


Figura E6 – Comparação de alturas de escoamento para o caudal de 527 m³/s nas secções 1 e 2

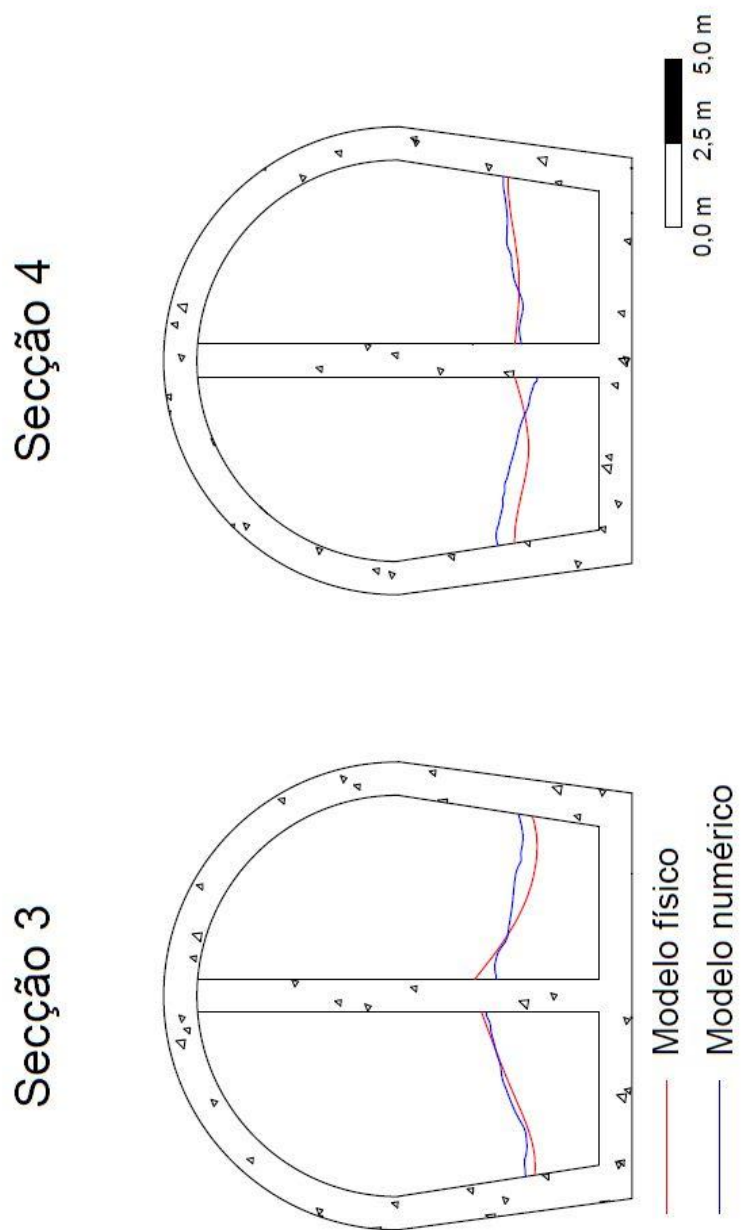


Figura E7 – Comparação de alturas de escoamento para o caudal de 527 m³/s nas secções 3 e 4

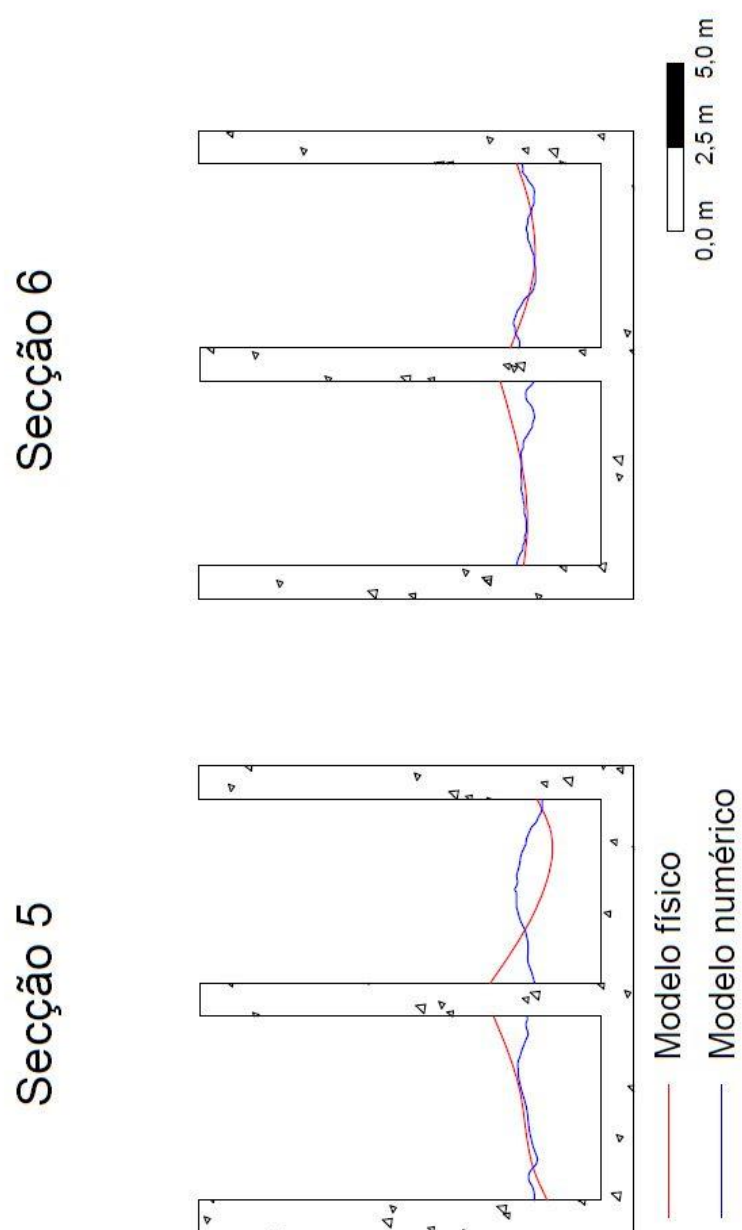


Figura E8 – Comparação de alturas de escoamento para o caudal de 527 m³/s nas secções 4 e 5

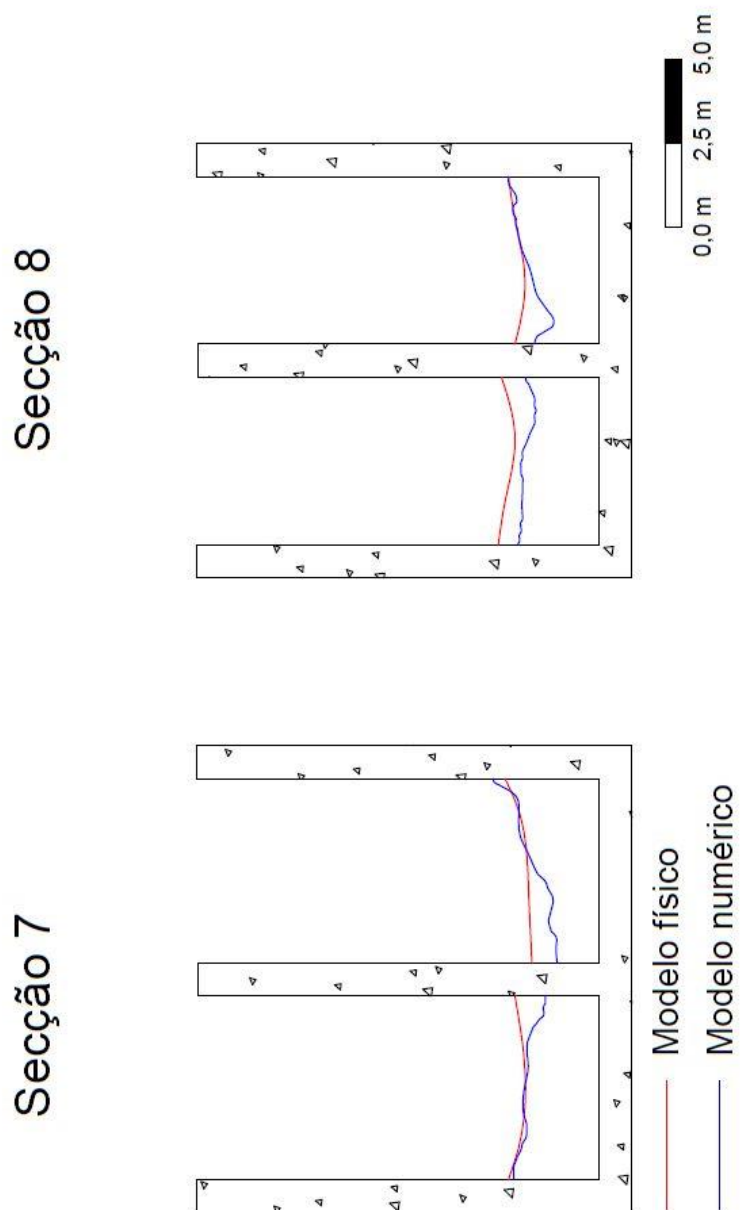


Figura E9 – Comparação de alturas de escoamento para o caudal de 527 m³/s nas secções 7 e 8

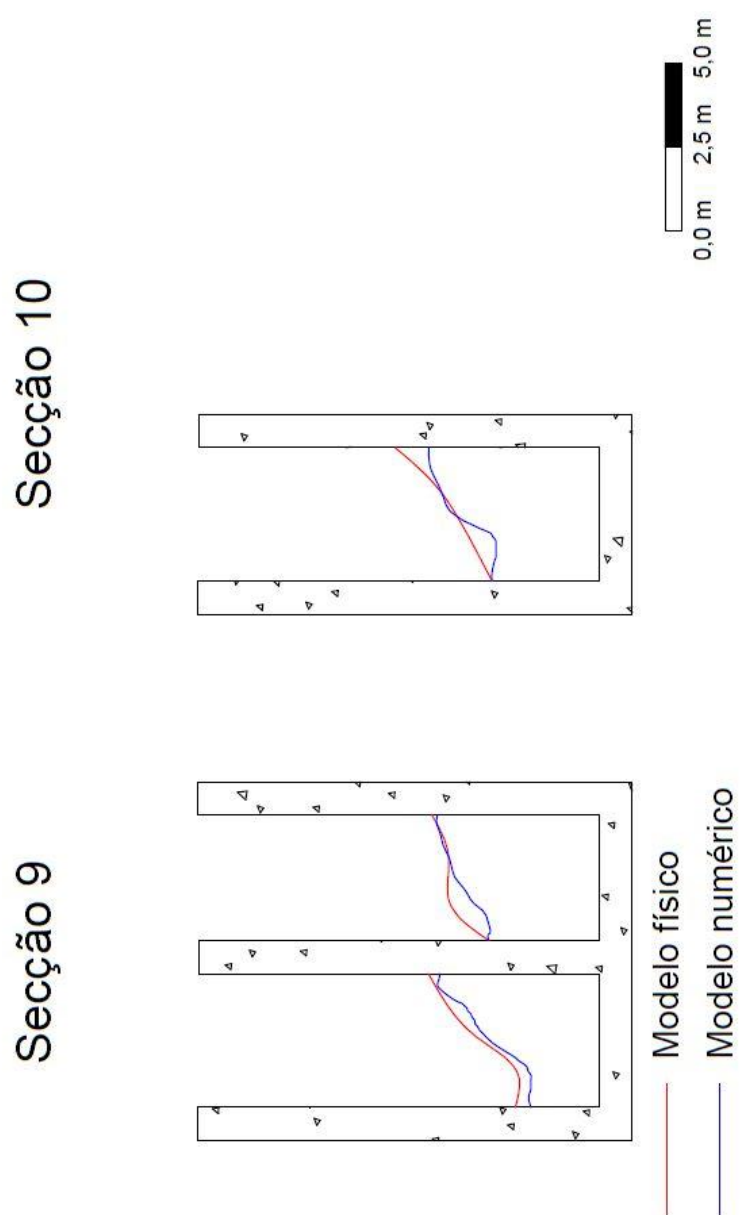


Figura E10 – Comparação de alturas de escoamento para o caudal de 527 m³/s nas secções 9 e 10

E.1.3 COMPARAÇÃO GRÁFICA DAS ALTURAS DE ESCOAMENTO PARA O CAUDAL DE 303 M³/S

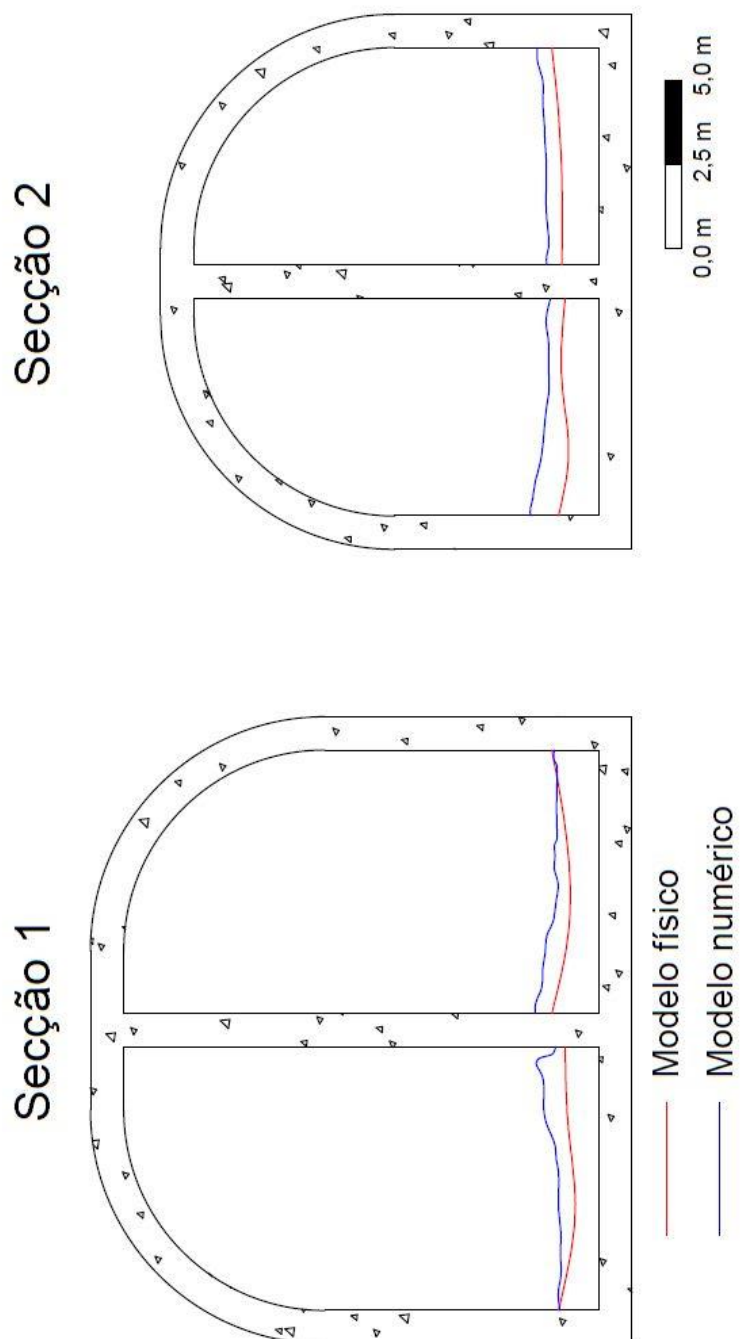


Figura E11 – Comparação de alturas de escoamento para o caudal de 303 m³/s nas secções 1 e 2

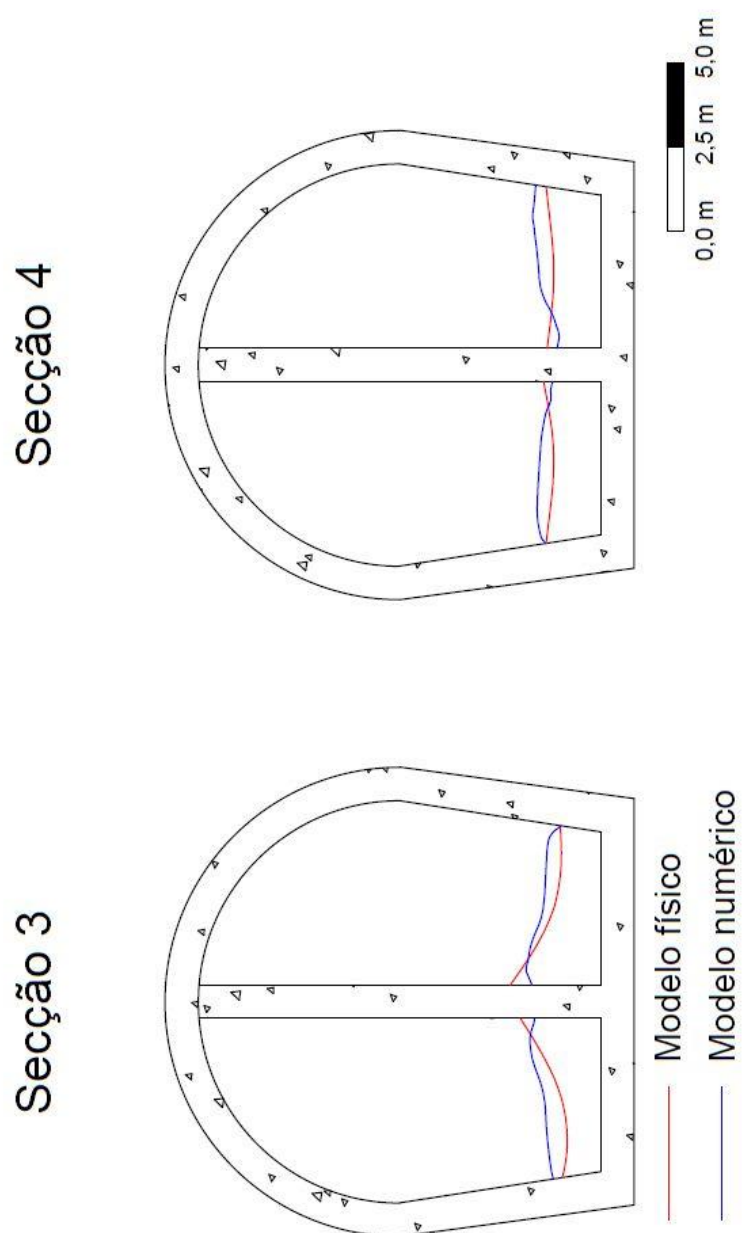


Figura E12 – Comparação de alturas de escoamento para o caudal de $303 \text{ m}^3/\text{s}$ nas secções 3 e 4

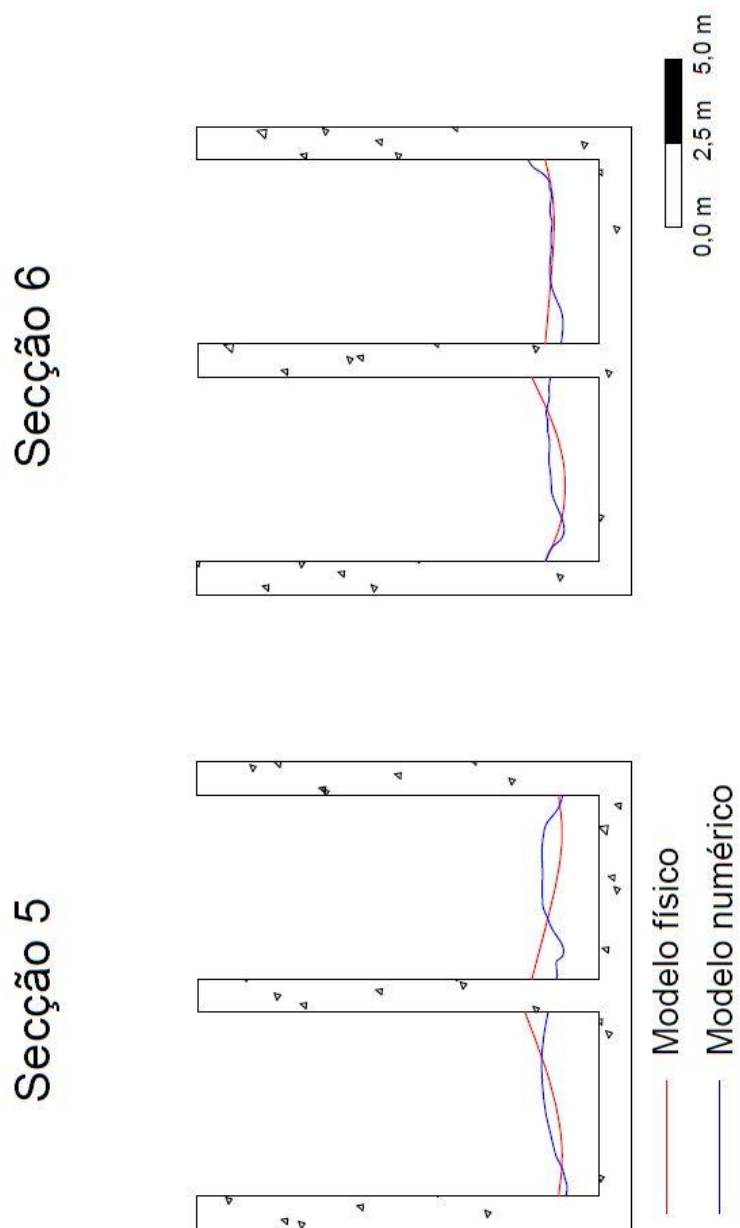


Figura E13 – Comparação de alturas de escoamento para o caudal de 303 m³/s nas secções 5 e 6

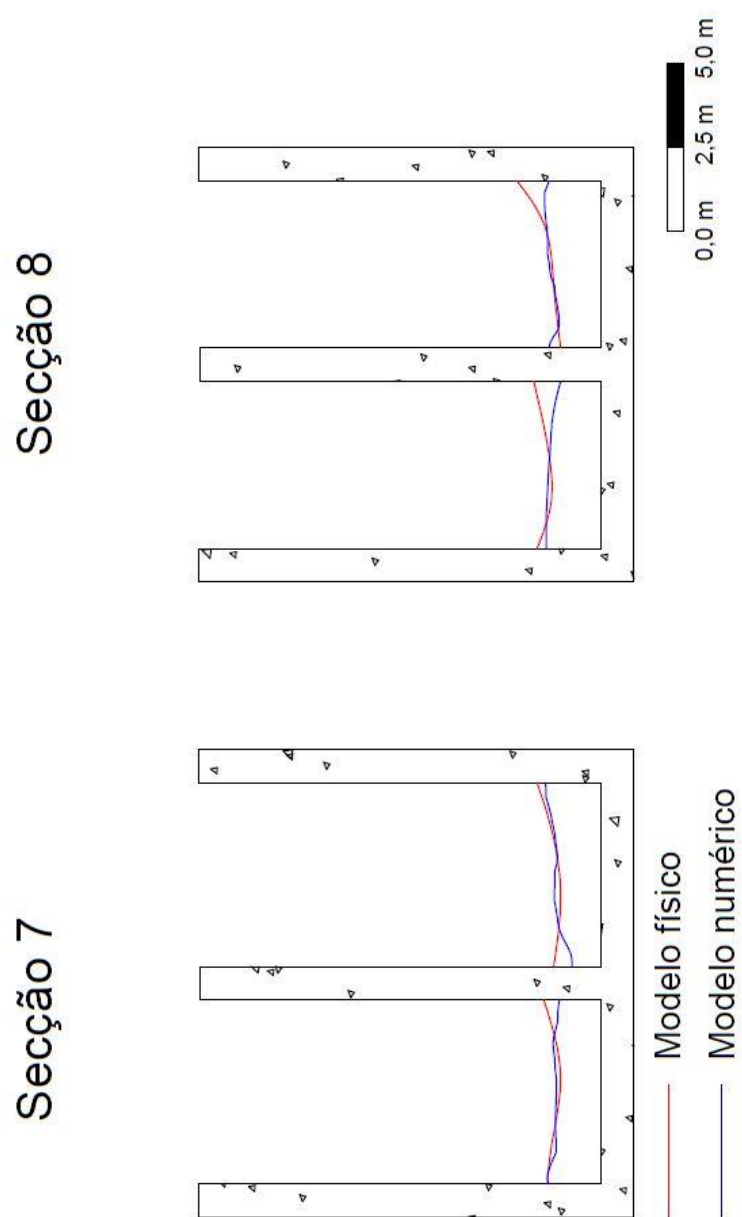


Figura E14 – Comparação de alturas de escoamento para o caudal de 303 m³/s nas secções 7 e 8

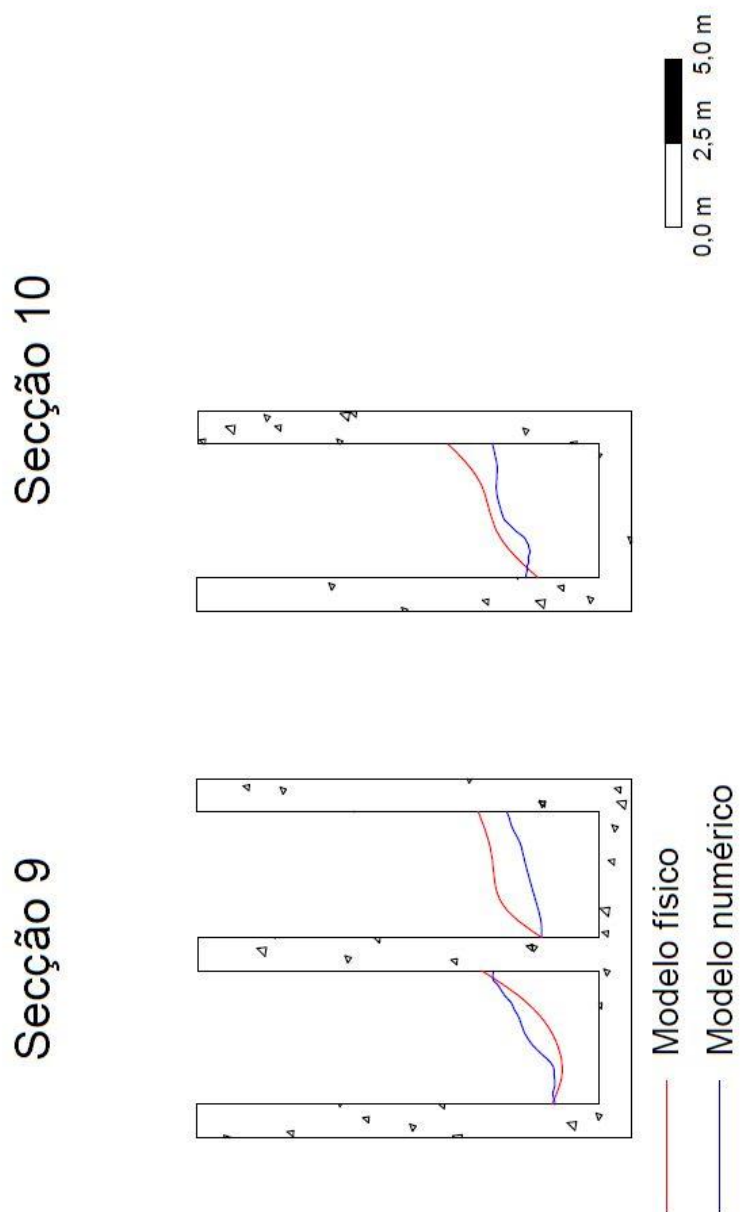


Figura E15 – Comparação de alturas de escoamento para o caudal de 303 m³/s nas secções 9 e 10

E.2 ANÁLISE COMPARATIVA DOS VALORES DE PRESSÃO

Tabela E1 – Comparação numéricas dos valores de pressão para $Q=2062 \text{ m}^3/\text{s}$

Tomada nº	Distância em Perfil	Cota de medição	Pressão (m.c.a.)		Tomada nº	Distância em Perfil	Cota de medição	Pressão (m.c.a.)	
			Modelo físico	Modelo numérico				Modelo físico	Modelo numérico
1	74,15	66,60	0,72	2,59	1D	0,00	24,94	14,79	15,59
2	76,19	67,00	0,06	0,78	1E	318,08	24,94	12,87	13,24
3	78,74	66,64	-1,13	0,57	2D	318,08	28,41	8,47	8,32
4	84,19	64,13	0,21	1,32	2E	318,08	28,41	6,48	5,84
5	89,15	60,42	5,52	4,36	3D	318,08	24,56	18,83	15,89
6	94,17	56,57	6,16	5,90	3E	325,51	24,56	16,41	14,94
7	105,37	48,92	11,64	11,29	4D	325,51	28,03	11,08	9,69
8	123,35	43,51	10,54	13,23	4E	325,51	28,03	9,22	6,98
9	158,45	39,89	8,29	7,96	5D	325,51	25,27	19,11	16,70
10	184,97	37,16	5,07	7,73	5E	332,65	25,27	14,71	11,81
11	213,03	34,21	4,80	7,52	6D	332,65	28,74	11,92	8,95
12	300,10	25,30	8,38	7,42	6E	332,65	28,74	5,72	4,17
13	318,08	23,45	15,56	16,39	7D	332,65	31,78	6,84	3,57
14	325,51	23,27	19,51	17,78	7E	332,65	31,78	2,12	-0,44
15	332,65	24,08	18,55	17,91	8D	332,65	26,75	7,89	9,71
16	338,79	25,26	16,51	12,85	8E	338,79	26,75	13,72	9,55
					9D	338,79	30,22	5,29	5,31
					9E	338,79	30,22	5,73	3,39
					10D	338,79	33,26	3,4	2,71
					10E	338,79	33,26	1,2	0,69

Tabela E2 – Comparação numéricas dos valores de pressão para Q=896 m³/s

Tomada nº	Distância em Perfil	Cota de medição	Pressão (m.c.a.)		Tomada nº	Distância em Perfil	Cota de medição	Pressão (m.c.a.)	
			Modelo físico	Modelo numérico				Modelo físico	Modelo numérico
1	74,15	66,60	10,14	9,50	1D	0,00	24,94	5,12	4,74
2	76,19	67,00	7,01	5,95	1E	318,08	24,94	3,82	3,15
3	78,74	66,64	1,35	1,56	2D	318,08	28,41	-	-
4	84,19	64,13	-0,78	-0,27	2E	318,08	28,41	-	-
5	89,15	60,42	3,04	1,68	3D	318,08	24,56	8,17	5,11
6	94,17	56,57	2,37	1,94	3E	325,51	24,56	5,56	4,08
7	105,37	48,92	5,07	5,04	4D	325,51	28,03	-0,45	-
8	123,35	43,51	2,17	6,73	4E	325,51	28,03	-	-
9	158,45	39,89	3,21	3,55	5D	325,51	25,27	11,61	7,32
10	184,97	37,16	0,98	3,60	5E	332,65	25,27	4,91	3,48
11	213,03	34,21	0,65	3,45	6D	332,65	28,74	1,88	0,93
12	300,10	25,30	4,22	2,91	6E	332,65	28,74	-0,29	-
13	318,08	23,45	6,57	6,06	7D	332,65	31,78	-	-
14	325,51	23,27	9,22	7,09	7E	332,65	31,78	-	-
15	332,65	24,08	9,38	9,29	8D	332,65	26,75	3,61	5,75
16	338,79	25,26	9,20	7,91	8E	338,79	26,75	12,48	4,44
					9D	338,79	30,22	0,2	1,93
					9E	338,79	30,22	-	-
					10D	338,79	33,26	-	1,17
					10E	338,79	33,26	-	-

Tabela E3 – Comparação numéricas dos valores de pressão para Q=690 m³/s

Tomada nº	Distância em Perfil	Cota de medição	Pressão (m.c.a.)		Tomada nº	Distância em Perfil	Cota de medição	Pressão (m.c.a.)	
			Modelo físico	Modelo numérico				Modelo físico	Modelo numérico
1	74,15	66,60	11,63	11,09	1D	0,00	24,94	4,44	4,74
2	76,19	67,00	8,68	7,72	1E	318,08	24,94	2,70	3,15
3	78,74	66,64	1,85	1,51	2D	318,08	28,41	-	-
4	84,19	64,13	-0,97	-0,47	2E	318,08	28,41	-	-
5	89,15	60,42	2,49	1,36	3D	318,08	24,56	5,94	5,11
6	94,17	56,57	2,81	1,54	3E	325,51	24,56	3,58	4,08
7	105,37	48,92	3,89	4,32	4D	325,51	28,03	0,17	-
8	123,35	43,51	2,66	5,99	4E	325,51	28,03	-	-
9	158,45	39,89	3,40	3,17	5D	325,51	25,27	9,69	7,32
10	184,97	37,16	0,42	2,89	5E	332,65	25,27	2,99	3,48
11	213,03	34,21	0,27	2,85	6D	332,65	28,74	0,64	0,93
12	300,10	25,30	3,48	2,65	6E	332,65	28,74	0,08	-
13	318,08	23,45	5,14	4,54	7D	332,65	31,78	-	-
14	325,51	23,27	7,05	5,59	7E	332,65	31,78	-	-
15	332,65	24,08	7,46	7,47	8D	332,65	26,75	2,56	5,75
16	338,79	25,26	7,40	7,34	8E	338,79	26,75	4,49	4,44
					9D	338,79	30,22	0,02	1,93
					9E	338,79	30,22	-	-
					10D	338,79	33,26	-	1,17
					10E	338,79	33,26	-	-

Tabela E4 – Comparação numéricas dos valores de pressão para Q=527 m³/s

Tomada nº	Distância em Perfil	Cota de medição	Pressão (m.c.a.)		Tomada nº	Distância em Perfil	Cota de medição	Pressão (m.c.a.)	
			Modelo físico	Modelo numérico				Modelo físico	Modelo numérico
1	74,15	66,60	12,68	12,64	1D	0,00	24,94	3,63	1,15
2	76,19	67,00	10,29	10,19	1E	318,08	24,94	1,77	1,31
3	78,74	66,64	2,53	3,65	2D	318,08	28,41	-	-
4	84,19	64,13	-0,97	-0,51	2E	318,08	28,41	-	-
5	89,15	60,42	1,99	1,01	3D	318,08	24,56	4,32	2,59
6	94,17	56,57	1,51	1,11	3E	325,51	24,56	2,22	1,11
7	105,37	48,92	2,96	3,31	4D	325,51	28,03	-	-
8	123,35	43,51	1,73	4,85	4E	325,51	28,03	-	-
9	158,45	39,89	2,96	2,56	5D	325,51	25,27	7,64	3,99
10	184,97	37,16	-0,26	2,48	5E	332,65	25,27	1,63	1,25
11	213,03	34,21	-0,10	2,42	6D	332,65	28,74	-	0,40
12	300,10	25,30	3,73	2,14	6E	332,65	28,74	-	-
13	318,08	23,45	4,83	3,59	7D	332,65	31,78	-	-
14	325,51	23,27	5,44	3,78	7E	332,65	31,78	-	-
15	332,65	24,08	6,03	5,52	8D	332,65	26,75	1,57	2,33
16	338,79	25,26	5,91	5,37	8E	338,79	26,75	2,5	2,22
					9D	338,79	30,22	-	-0,16
					9E	338,79	30,22	-	-
					10D	338,79	33,26	-	-
					10E	338,79	33,26	-	-

Tabela E5 – Comparação numéricas dos valores de pressão para $Q=303 \text{ m}^3/\text{s}$

Tomada nº	Distância em Perfil	Cota de medição	Pressão (m.c.a.)		Tomada nº	Distância em Perfil	Cota de medição	Pressão (m.c.a.)	
			Modelo físico	Modelo numérico				Modelo físico	Modelo numérico
1	74,15	66,60	14,11	14,43	1D	0,00	24,94	1,65	0,00
2	76,19	67,00	12,90	13,36	1E	318,08	24,94	-	0,11
3	78,74	66,64	5,32	7,08	2D	318,08	28,41	-	-
4	84,19	64,13	-0,47	-0,27	2E	318,08	28,41	-	-
5	89,15	60,42	1,18	0,62	3D	318,08	24,56	1,91	1,58
6	94,17	56,57	0,95	0,49	3E	325,51	24,56	1,29	0,22
7	105,37	48,92	1,47	1,51	4D	325,51	28,03	-	-
8	123,35	43,51	0,43	3,03	4E	325,51	28,03	-	-
9	158,45	39,89	2,22	1,69	5D	325,51	25,27	4,29	2,44
10	184,97	37,16	-1,00	1,65	5E	332,65	25,27	-	0,37
11	213,03	34,21	-0,96	1,68	6D	332,65	28,74	-	-
12	300,10	25,30	2,30	1,28	6E	332,65	28,74	-	-
13	318,08	23,45	2,79	1,75	7D	332,65	31,78	-	-
14	325,51	23,27	3,08	2,10	7E	332,65	31,78	-	-
15	332,65	24,08	3,74	3,04	8D	332,65	26,75	0,02	2,11
16	338,79	25,26	3,49	3,60	8E	338,79	26,75	-	0,81
					9D	338,79	30,22	-	-
					9E	338,79	30,22	-	-
					10D	338,79	33,26	-	-
					10E	338,79	33,26	-	-